

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

MÉCANISMES CÉRÉBRAUX IMPLIQUÉS DANS L'EXPRESSION DU DEGRÉ
DE CERTITUDE CHEZ LE NOVICE LORS DE LA RÉOLUTION DE TÂCHES
SCIENTIFIQUES PORTANT SUR L'ÉLECTRICITÉ

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN ÉDUCATION

PAR
ÉLAINE TURMEL

MAI 2015

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.07-2011). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

COGNITIVE DISSONANCE – « Sometimes people hold a core of belief that are very strong. When they are presented with evidence that works against that belief, the new evidence cannot be accepted. It would create a feeling that is extremely uncomfortable, called cognitive dissonance. And because it is important to protect the core belief, they will rationalize, ignore and even deny anything that doesn't fit in with the core belief. » – Frantz Fanon

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	viii
LISTE DES SYMBOLES	ix
RÉSUMÉ	x
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
PROBLÉMATIQUE.....	2
1.1 – Pertinence socio-économique	2
1.2 – Pertinence éducative	5
1.2.1 – Des représentations intuitives difficiles à faire évoluer.....	7
1.2.2 – Les modèles d’enseignement en cause	8
1.3 – Pertinence scientifique	9
1.3 – Objectif de recherche	12
CHAPITRE II	
CADRE THÉORIQUE	13
2.1 – Le changement conceptuel.....	13
2.1.1 – Le modèle de Posner <i>et al.</i> (1982)	15
2.1.2 – Le modèle de Dreyfus <i>et al.</i> (1990)	21
2.2 – L’incertitude.....	25
2.2.1 – L’incertitude dans la recherche.....	27
2.2.2 – L’incertitude en contexte scolaire.....	30
2.2.3 – Bases biologiques de l’incertitude	33
2.2.4 – Définition de l’incertitude.....	38

CHAPITRE III	
CADRE MÉTHODOLOGIQUE	40
3.1 – Les participants	40
3.1.1 – Critères de sélection des participants	40
3.1.2 – Protocole de recrutement	44
3.2 – Instrumentation	45
3.2.1 – Choix de la technique d'imagerie cérébrale	45
3.2.2 – Les conditions expérimentales	47
3.2.3 – Conception des stimuli	51
3.2.4 – La tâche cognitive : design	54
3.2.5 – La tâche cognitive : pré-expérimentation et tâche finale	54
3.3 – Déroulement	56
3.3.1 – Consignes et protocole à l'UNF	56
3.3.2 – Contraintes lors de l'acquisition de données	57
3.3.3 – Acquisition des images	59
3.4 – Analyse des données	62
3.4.1 – La correction du mouvement	62
3.4.2 – Normalisation	63
3.4.3 – Lissage	63
3.4.4 – Modèle linéaire général	64
3.5 – Considérations éthiques	65
CHAPITRE IV	
RÉSULTATS	66
4.1 – Résultats comportementaux	66
4.2 – Résultats d'imagerie	71
4.2.1 – Contraste Certitude - Incertitude	74
4.2.2 – Contraste Incertitude - Certitude	74
CHAPITRE V	
INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	76
5.1 – Hypothèse 1 : Certitude - Incertitude	76
5.2 – Hypothèse 2 : Incertitude d'attribution interne et externe	77
5.2.1 – Incertitude d'attribution interne	78
5.2.2 – Incertitude d'attribution externe	79
5.2.3 – Combinaison des deux types d'incertitude	80
5.3 – Cortex cingulaire antérieur gauche (insula)	80

CHAPITRE VI	
CONCLUSION.....	83
RÉFÉRENCES	85
APPENDICE A	
ADIS-IV CONDENSÉ :	
TEST DE DÉPISTAGE DES TROUBLES ANXIEUX	96
APPENDICE B	
COUPON DE PARTICIPATION : ÉTAPE DE	
RECRUTEMENT POUR L'IMAGERIE CÉRÉBRALE.....	98
APPENDICE C	
FORMULAIRE DE DÉPISTAGE UNF :	
DÉPISTAGE PRÉLIMINAIRE POUR ÉTUDE	
D'IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE (IRM)	100
APPENDICE D	
TABLEAU DÉTAILLÉ DE L'ÉCHANTILLONNAGE	103
APPENDICE E	
TABLEAU DES HUIT CONDITIONS EXPÉRIMENTALES	104
APPENDICE F	
FORMULAIRE DE CONSENTEMENT ÉTHIQUE.....	106
APPENDICE G	
PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL LORS	
DE L'ACQUISITION DES DONNÉES	115
APPENDICE H	
FORMULAIRE DE L'UNITÉ DE	
NEUROIMAGERIE FONCTIONNELLE	119

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
3.1 – Extrait de la tâche composée de 222 circuits électriques	56
3.2 – Aperçu de l'analyse des données réalisées à l'aide de SPM 8	62
4.1 – Régions du cerveau significativement activées pour les contrastes <i>Incertitude > Certitude et Certitude > Incertitude</i> ($p < 0,0005$, non corrigé, min 20 voxels)	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 – Couplage de performances, du niveau de certitude et modèle d’Hasan (1999)	25
3.1 – Distribution de l’âge des participants	43
3.2 – Comparaisons statistiques de l’échantillon	43
3.3 – Sommaire des huit conditions expérimentales : vocabulaire et acronymes.....	49
3.4 – Correspondance des conceptions naïves et exemples de stimuli	50
3.5 – Paramètres liés à l’acquisition des images.....	59
4.1 – Portrait des résultats comportementaux	65
4.2 – Portrait des séries complètes et incomplètes par participant	68
4.3 – Vue d’ensemble des résultats d’imagerie ($p < 0,0005$, <i>non corrigé, min 20 voxels, MNI coordinates in mm, L = left, R = right, LR = left and right</i>)	71

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BA	Brodmann Area
BOLD	Blood-Oxygen-Level-Dependant
CCA	Cortex cingulaire antérieur
CRI	Certainty Response Index (Hasan <i>et al.</i> 1999)
CST	Conseil des sciences et de la technologie
DLPFC	Cortex préfrontal dorso-latéral
DSM-IVR	Manuel diagnostique et statistique, version 4 révisée
EEG	Électroencéphalogramme
FMC	Cortex fronto-médian
IRMf	Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle
IUGM	Institut universitaire de gériatrie de Montréal
MEG	Magnétoencéphalographie
mPFC	Cortex préfrontal médian
OCDE	Organisation de coopération et de développement économique
OGM	Organisme génétiquement modifié
PET	Tomographie par émission de positrons
PISA	Program for International Student Assessment
PPC	Cortex pariétal postérieur
PSE8	Photoshop Élément 8
SPM8	Statistical Parametric Mapping version 8
TAG	Trouble d'anxiété généralisé
UQAM	Université du Québec à Montréal
UNF	Unité de neuroimagerie fonctionnelle

LISTE DES SYMBOLES

Y	Données
X_i	Facteurs
β_i	Pondérations
ε	Variabilité inexpliquée

RÉSUMÉ

Depuis maintes années, plusieurs études en didactique des sciences portant sur le changement conceptuel ont laissé croire que seul le choc cognitif pouvait ébranler l'écologie conceptuelle naïve ou intuitive de l'apprenant novice et l'amener à apprendre les concepts scientifiques. Or, récemment, des études neuroscientifiques, en psychologie cognitive et en didactique amènent un tout autre éclairage sur la question du changement conceptuel. Il semble que le choc cognitif tel qu'observé lors d'un enseignement de type transmissif, n'arrive pas à solliciter l'apprentissage durable, au contraire. L'étude présentée dans ce mémoire s'intéresse aux mécanismes cérébraux impliqués dans l'incertitude, comme alternative au choc cognitif traditionnel, et ce, selon deux hypothèses; d'une part, que les mécanismes cérébraux associés à la certitude seront différents de ceux associés à l'incertitude, d'autre part que deux types d'incertitude seront observées selon le type. Ainsi, 22 participants novices sains (sans trouble anxieux soupçonné), âgés de 18 à 20 ans furent recrutés puis soumis à un protocole d'IRMf. Au final, les régions associées à la certitude concernent les activations bilatérales au cortex intrapariétal latéral, dans la région postérieure, et le lobule pariétal supérieur, plutôt associés au traitement visuel. Pour l'incertitude d'attribution interne, on note l'activation du cortex frontal dorsolatéral droit, associé à la métacognition, et le cortex cingulaire antérieur pour l'incertitude d'attribution externe, associé à la détection des conflits cognitifs ou des erreurs. Ces résultats confirment les hypothèses. Ainsi, l'incertitude activerait des régions associées à l'apprentissage, contrairement au choc cognitif traditionnel, ou la certitude.

MOTS CLÉS : incertitude; doute; certitude; mécanismes cérébraux; IRMf; didactique; sciences et technologies; changement conceptuel

INTRODUCTION

Le présent mémoire de maîtrise s'intéresse à un élément d'une problématique issue de la didactique des sciences au secondaire au Québec, c'est-à-dire la difficulté à faire évoluer les conceptions initiales des élèves. Il s'inscrit dans une tradition au sein de l'équipe de didactique des sciences au département de didactique de l'Université du Québec à Montréal, qui a étudié diverses pratiques et conceptions de l'enseignement des sciences et technologies au secondaire, entre autres le changement conceptuel en physique électrique. Cette matière obligatoire s'avère, en effet, une opportunité hors pair pour l'étude du changement conceptuel, du fait que les conceptions naïves y sont bien connues et étudiées, et qu'il advient donc plus aisé d'observer ledit changement conceptuel chez le novice du fait que l'on connaisse bien le point de départ naïfs de ces apprentissages scientifiques. Ainsi, l'étude à la base de ce mémoire traitera de conceptions naïves et scientifiques relevées dans le domaine de la physique électrique, et il sera question d'investiguer le rôle de l'incertitude dans l'évolution des concepts chez le novice.

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE

Dans ce chapitre, une triple pertinence sera développée pour situer ladite problématique. D'une part, il sera question de pertinence socio-économique quant à la difficulté à intéresser les jeunes aux carrières scientifiques et les enjeux économiques qui y sont reliés, ainsi qu'au développement d'un citoyen conscient, informé, critique des enjeux sociaux qui l'entourent. Dans cette section sera aussi élaboré la pertinence éducative de l'étude, cette dernière provenant des limites des méthodes pédagogiques populaires et celles des études antérieures en enseignement des sciences quant aux lacunes du modèle de changement conceptuel actuel pour faire évoluer les conceptions scientifiques des étudiants. Enfin ceci mènera vers la pertinence scientifique de l'étude, c'est-à-dire la nécessité d'explorer une approche de recherche peu fréquentée afin de comprendre la problématique décrite concernée par ce mémoire.

1.1 Pertinence socio-économique

Le présent mémoire s'inscrit ainsi dans un contexte économique et social particulier de globalisation des marchés et d'immigration massive (OCDE, 2007) ; avec cette conjoncture comme trame de fond à la réussite des nations et de leurs citoyens, une importante difficulté pour les gouvernements devient dès lors d'assurer que l'offre de formation réponde adéquatement aux besoins des marchés en constant changement. (OCDE, 2007). Ainsi, plusieurs entreprises internationales ont récemment dû miser sur l'innovation pour faire concurrence aux pays nouvellement industrialisés comme

la Chine, l'Inde ou le Brésil, là où les salaires moins élevés pour une main-d'œuvre qualifiée offrent de réelles opportunités aux investisseurs (Conseil des sciences et de la technologie, 2010). Et qui dit innovation dit recherches et développements technologiques et scientifiques, et ainsi suivre la concurrence sur ce nouvel échiquier mondial (OCDE, 2006).

Ainsi, en réponse à ce besoin de formation pressant, le rapport du PISA (2006) explique que les gouvernements des pays de l'OCDE ont récemment dû entreprendre d'importantes réformes de leurs programmes de formation en sciences et technologie afin d'améliorer la qualité des services en éducation, d'inciter les individus et les sociétés à élever leur niveau de compétence, et donc à élever la capacité à des pays de l'OCDE à concurrencer les pays en développement. Le Québec a d'ailleurs aussi clairement exprimé cette préoccupation dans le *Programme de l'école québécoise* (Gouvernement du Québec, 2003), alors qu'on y soutient qu'un défi de taille s'impose à l'école pour former une main-d'œuvre qualifiée en quantité suffisante, une main-d'œuvre non seulement de haut niveau de compétence, mais qui possède aussi une facilité d'adaptation et d'innovation rapide.

Or, il existe un écart important entre l'évolution rapide des sciences et des technologies de la société, et leur appropriation par la population (Hasni, 2005). Et selon Hasni (2005), la source de cet écart entre la demande en main-d'œuvre qualifiée et l'offre des écoles et autres centres de formations spécialisées se situe au niveau de la façon dont, justement, l'école exerce son rôle dans le développement de la culture scientifique. Parce que malgré les bonnes performances des étudiants québécois aux épreuves ministérielles de quatrième secondaire en sciences physiques :

[...] l'école réussit mal à intéresser les enfants aux sciences et à la technologie, à leur transmission à une juste représentation de ce qu'elles sont, à les convaincre de poursuivre des études en sciences et technologie, et à susciter des vocations. (CST, 2002, p. 76).

Cette situation peut laisser croire que non seulement les jeunes choisissent peu les carrières reliées aux sciences et technologies, mais aussi qu'elle ne semble pas fournir une représentation juste de ce que les sciences et les technologies sont et peuvent apporter dans leur vie quotidienne.

Par conséquent, si l'école arrive mal à intéresser les jeunes non seulement envers les carrières scientifiques et techniques, mais aussi envers les disciplines elles-mêmes, c'est alors toute la société qui risque de perdre une main-d'œuvre compétitive en pharmaceutiques ou en aéronautique, par exemples, atouts majeurs pour la compétitivité du Québec au plan mondial; mais aussi et non le moindre, sur le plan social, ce désintéressement envers les sciences risque d'entraîner une certaine désensibilisation de la population émergente envers les enjeux d'actualité tels sur les changements climatiques ou l'énergie nucléaire, voire le clonage. À cet effet, quelques chercheurs se sont intéressés au développement de la citoyenneté par l'intermédiaire d'une éducation scientifique. Dans les années 1980 et 1990 on s'intéressait à l'importance de former les élèves à la citoyenneté par l'étude des enjeux qu'apportait la nouvelle ère, le 21^e siècle (Bybee, 1982; D'Ambrosio, 2004). Puis dans les années 2000 on s'intéresse à l'injustice sociale, la dégradation de l'environnement et aux pertes culturelles qu'apporte la mondialisation (Ping Lim, 2008; Kolsto, 2001; Schindel Dimick, 2012), et on propose d'utiliser l'éducation scientifique pour permettre aux élèves de mieux comprendre ce qui se passe dans leurs communautés. On s'intéresse d'ailleurs à l'impact des médias dans la perception des sciences qu'ont les citoyens (Dimopoulos, 2002) et l'impact des pratiques pédagogiques et le manque de formation des maîtres, sur la pensée épistémologique scientifique des futurs citoyens (Ryder, 2002). Ces recherches montrent tout le potentiel « d'empowerment » qu'offrent l'éducation scientifique et technologique; d'abord pour mieux comprendre les changements auxquels les citoyens font face dans leur communauté, mieux comprendre les conflits et enjeux internationaux diffusés

par les médias, mais aussi pour donner des moyens concrets aux apprenants afin de développer un sentiment d'engagement dans leur parcours académique, sociale et politique (Schindel Dimick, 2012). Le présent mémoire n'a certes pas la prétention de répondre à cette demande, mais plutôt d'améliorer la didactique des sciences et technologie en vue de les rendre plus significatives pour l'apprenant, futur travailleur et surtout, futur citoyen.

En somme, si l'école parvenait mieux à faire évoluer les conceptions scientifiques des jeunes et à montrer la pertinence de telles connaissances dans leur quotidien, elle arriverait peut-être mieux à créer un intérêt envers les carrières scientifiques et technologiques, elle parviendrait probablement à créer une main-d'œuvre à la hauteur des demandes de la conjoncture socio-économique actuelle, et donc une population éduquée et critique devant les grands enjeux scientifiques et technologiques, une population plus critique, adaptable et concurrente, et plus engagée. Au plan socio-économique, la pertinence de cette recherche s'intéresse donc à la didactique des sciences dans cet angle de vue.

1.2 Pertinence éducative

Au plan éducatif, dès 1998 en Belgique, Fourez déplorait déjà le fait que l'enseignement des sciences ne soit pas assez lié à l'aspect social des savoirs scientifiques, alors qu'en France, l'école s'était dotée d'objectifs d'intervention visant, de manière normative, certains comportements individuels et sociaux considérés souhaitables par la société (Astolfi, 2005). Quoi qu'il apparaisse discutable que cette mission incombe uniquement à l'école, une vision s'inscrit ainsi dans le curriculum, laquelle exerça une pression sur les enseignants scientifiques dans l'ajustement de leurs pratiques ; la nutrition, la sexualité, l'éducation à l'environnement, la santé, autant de sujets touchant les sciences comme domaines de formation en lien avec tout l'aspect social et civique du citoyen à former (Astolfi,

2005). Dans le même optique, au Québec, le gouvernement exprimait dans sa nouvelle politique d'évaluation des apprentissage de 2004 l'intégration des connaissances requises en enseignement des sciences dans différentes disciplines afin de les mettre en contexte dans différentes expériences de vie, donc de leur donner un sens social (Gouvernement du Québec, 2004).

Malgré cette vision plus intégriste des savoirs scientifiques, Astolfi (2005) observait que les enseignants de science et technologie utilisent des pratiques éducatives qui demeurent en rupture avec la nature même de l'approche scientifique, laquelle pousse plutôt à la recherche, au questionnement, au développement du sens critique des faits observés dans la vraie vie, des conceptions naïves. Ainsi, les enseignants miseraient malheureusement que sur l'absorption de contenus prescrits par un curriculum de savoirs sous forme de simples chaînes de faits;

Non seulement les savoirs scolaires contribuent assez peu à la résolution de problèmes ou à l'acquisition de connaissances nouvelles à l'extérieur de l'école, mais encore, les connaissances spontanées acquises en dehors de l'école sont peu sollicitées pour supporter l'apprentissage scolaire. (Astolfi 2005, p. 663).

Ainsi, cet écart entre les pratiques éducatives et la posture plutôt critique de la méthode scientifique pose problème dans la mesure où il provoque une certaine « automatisation des moments d'apprentissage par rapport à la vraie vie » (*ibidem*), occasionnant ainsi une perte de signification des contenus enseignés. Ainsi l'on comprend donc que l'enseignement scientifique ne devrait pas se ramener à un enseignement systématique des résultats énoncés à travers un simple texte de savoirs, car cette maladroite transposition des savoirs disciplinaires vers des savoirs scolaires risque d'enfermer le succès de la scolarisation scientifique dans des normes contraignantes, des dogmes rigides (Astolfi, 2005 ; Martinand, 2001).

Au final, l'école réussit peut-être mal à intéresser les jeunes en raison non pas des intentions curriculaires, mais plutôt des pratiques enseignantes peu contextualisantes et normatives. Sans vouloir généraliser, cette problématique des pratiques d'enseignants soulève ainsi des questions didactiques fondamentales (Astolfi, 2005), car elle relève un caractère figé, certes, mais surtout non fonctionnel. Ce qui se fait à l'école semble avoir peu d'impact sur ce qui se passe à l'extérieur de cette dernière.

1.2.1 Des représentations intuitives difficiles à faire évoluer

Ainsi, l'école est aux prises avec des enseignements qui favorisent peu la remise en question des connaissances spontanées acquises en dehors de l'école. À cet effet, Legendre (1994) avait constaté que l'absence de correspondance entre formalisme et intuition rendait davantage difficile l'accès aux notions scientifiques enseignées dans un tel cadre pédagogique. À cet égard, certains soulignent la prédominance d'une épistémologie empiriste chez les enseignants (Nadeau et Désautels, 1984 ; Ruel, 1994). C'est donc encore une fois l'image positiviste des sciences que l'école entretient depuis longtemps, au détriment d'une démarche imaginative, réflexive et interrogative, qui affecte le changement des concepts en science chez l'apprenant ; les enseignants privilégieraient malgré tout la précision et la production d'une réponse juste, au lieu d'un processus d'investigation et une vision critique des sciences (CST, 2002), probablement au détriment d'évolutions intéressantes dans les conceptions des élèves.

Par conséquent, les savoirs spontanés issus de la vie quotidienne sont souvent en conflit, voire en confrontation avec les modèles enseignés, et ces représentations demeurent très peu modifiées par l'enseignement, alors que dans la vie de tous les jours, ces représentations prennent généralement le dessus sur la connaissance enseignée à l'école (di Sessa, 1988 ; Driver, 1989 ; Duit, 1991 ; Gunstone, 1990). Legendre (1994) concluait qu'il devient donc difficile pour l'élève de s'approprier le

savoir scientifique, faute de pouvoir lui donner un sens à partir des connaissances antérieures ou de ses conceptions spontanées.

1.2.2 Les modèles d'enseignement en cause

Ainsi, qu'elles soient issues de l'expérience quotidienne ou des idées véhiculées par les cultures et les médias, plusieurs études confirment que l'enseignement traditionnel de type transmissif n'altère pas suffisamment les conceptions initiales des élèves (Jaakkola, Nurmi et Vermann, 2011 ; Confrey, 1994 ; Liu, 2001 ; Wandersee, 1994) et qu'un tel enseignement n'est pas approprié pour le développement d'habiletés de haut niveau, par exemple la résolution de problèmes (Potvin, Riopel, Masson et Fournier, 2010).

Or il ne suffit pas de confronter les conceptions initiales de l'élève avec celles que l'on tente de lui enseigner pour que celui-ci en tire satisfaction (Dreyfus, Jungwirth et Elovitch, 1990 ; Dykstra, Boyle et Monarch, 1992 ; Limon et Carrero, 1997) et conséquemment les changer. En effet, plusieurs modèles pédagogiques visant le changement conceptuel ont été étudiés (Ates, 2005 ; Wang et Andre, 1991, McDermott et Shaffer, 1992), mais un constat demeure : certaines conceptions initiales restent inaltérées, autant par l'expérience directe via une expérimentation (Ronen et Eliahu, 2000 ; Potvin *et al.*, 2010) que par l'approche basée sur l'enseignement traditionnel explicatif et théorique (Potvin *et al.*, 2010). À ce propos, Posner *et al.* (1982) avaient déjà exposé que pour arriver à un changement conceptuel, il s'avère primordial que l'élève arrive à voir les lacunes de ses conceptions initiales avant même de pouvoir envisager le changement conceptuel, autrement dit qu'il les remette en question, qu'il doute de leur capacité à expliquer un phénomène ; et pour que l'élève doute de ses conceptions initiales, il semble qu'il faille favoriser une pédagogie qui laisse place à l'incertitude (Potvin *et al.*, 2010). Cet état d'incertitude face à ses conceptions initiales apparaît ainsi comme l'élément clé

du changement conceptuel car il influence les apprentissages futurs et l'état de vigilance quant à ses propres conceptions (Lee, Kwon, Park et Kim, 2003 ; Potvin *et al.*, 2010), et leur permettant de rester, par le fait même, vigilants sur leurs propres processus de raisonnement.

1.3 Pertinence scientifique

Quoique ces chercheurs parlent de choc cognitif ou de doute scientifique (Posner *et al.* 1982; Limon *et al.* 2004), le débat subsiste à savoir comment créer ce dernier dans l'esprit des apprenants, voire simplement comprendre les caractéristiques optimales d'un tel choc cognitif pour arriver au changement conceptuel. À cet égard, plusieurs recherches ont étudié les mécanismes cérébraux reliés à l'incertitude. Ces recherches ont tantôt étudié les niveaux d'incertitude dans des tâches d'ambiguïté (Huettel, Song et McCarthy, 2005), des tâches où le participant devait envisager les probabilités qu'un événement survienne (Krain, Hefton, Pine, Ernst, Castellanos et Klein, 2006 ; Volz, Schubotz et von Cramon, 2003). Une équipe de chercheurs (Volz, Schubotz et von Cramon, 2004, 2005) a d'ailleurs spécifiquement étudié différents types d'incertitude, dont celle reliée au manque de connaissances dans une tâche d'association stimuli-réponse dans laquelle les règles d'association étaient plus ou moins clairement explicites pour le participant, créant ainsi différents niveaux de certitude. Enfin, plusieurs autres recherches ont utilisé des tâches de rappel mnémonique où les participants devaient indiquer leur niveau de confiance quant à un rappel d'informations apprises au préalable, par exemple des mots ou des visages (Chua, Schacter, Rand-Giovannetti et Sperling, 2006 ; Henson, Rugg, Shallice et Dolan, 2000 ; Kim et Cabeza, 2009). Mais aucune de ces recherches n'a étudié la prise de décision sous incertitude dans un contexte relatif à l'enseignement de concepts en science.

Certes, quelques recherches en psychologie utilisant les neurosciences ont montré qu'il est possible de promouvoir un meilleur contrôle cognitif (Houdé *et al.*, 2000 ; Houdé *et al.* 2001) en vu d'un réel changement conceptuel. Pour ce faire, il semble réaliste de croire qu'un contrôle cognitif et une sensation de doute aient été déclenchés suite à l'entraînement dans lequel on soumet l'apprenant à l'inhibition des réponses non désirées (*ibidem*). Dans ces recherches, le doute émerge non pas d'une confrontation avec des données contradictoires, mais plutôt de l'interaction entre l'enseignant et l'élève dans laquelle des pièges sont identifiés lors de la résolution de problèmes, ce qui permettait non seulement d'identifier les bonnes réponses, mais surtout d'identifier les réponses parsemées des pièges (*ibidem*). Bien que les recherches d'Houdé ne portent pas explicitement sur le changement conceptuel, cet entraînement a démontré une plus grande mobilisation des ressources cognitives chez les apprenants, laissant croire qu'un apprentissage adéquat des concepts liés à des phénomènes physiques requiert minimalement la mobilisation du cortex frontal et ses régions associées à l'inhibition de conceptions ou réponses erronées, dont le cortex cingulaire antérieur.

Mais si la sensation du doute semble jouer un rôle clé dans le changement conceptuel, ces recherches n'ont toutefois pas tenté de l'observer directement afin d'en étudier les mécanismes cérébraux. À notre connaissance, aucune de ces recherches concernant le changement conceptuel en didactique des sciences n'ont pris en compte le degré de certitude des participants par rapport aux réponses qu'ils émettaient, pour découvrir les mécanismes cérébraux associés à la sensation de douter.

Mais l'idée d'une incertitude par l'intermédiaire d'une confrontation cognitive pour ébranler les conceptions initiales de l'élève n'est pas une idée récente. La problématique scientifique de ce mémoire ne s'inscrit donc pas dans la nécessité d'étudier l'importance du rôle du doute dans le changement conceptuel, mais plutôt

dans l'importance de l'étudier autrement. En effet, la majorité des études récentes sur le changement conceptuel se réfère de près ou de loin à deux grandes recherches clés, c'est-à-dire celles de Kuhn (1962) et Piaget (1964), (voir Potvin, Mercier, Charland et Riopel ; 2012). Ces recherches ayant influencé les pratiques enseignantes depuis les cinquante dernières années, le constat amené par la problématique de ce mémoire quant à la difficulté récurrente de faire évoluer les concepts initiaux des élèves indique qu'il faille étudier le rôle de l'incertitude sous une autre perspective.

Ainsi, non seulement il apparaît que l'état actuel des connaissances concernant les mécanismes cérébraux impliqués dans l'incertitude ne permet pas de les identifier clairement, mais cela rend dès lors plus difficiles d'éventuelles prescriptions pédagogiques de modèles d'enseignement des conceptions scientifiques plus appropriées pour engendrer un changement conceptuel chez l'apprenant. Les découvrant, il deviendrait possible de comparer, par exemple, les stratégies d'enseignement connues entre elles et leurs effets sur la mobilisation desdits mécanismes, voire sur le changement conceptuel. Dans cette perspective, on imagine comparer les patrons d'activation de cerveau d'apprenants ayant été stimulés par deux traitements pédagogiques différents, par exemple, pour ainsi proposer celui qui mobilise davantage l'incertitude productive.

Il devient aussi possible d'observer l'impact de différents types d'incertitude sur les comportements des apprenants, et donc de les associer à différents types cognitifs, voire de développer des approches pédagogiques adaptées en fonction de la tolérance ou de l'intolérance à l'incertitude. On peut ici envisager la possibilité d'enrichir les théories actuelles sur les types d'apprenants, les styles cognitifs, et de différencier les approches, voire les marier en meilleure connaissance de cause. On peut aussi différencier un apprenant incertain de lui-même comparativement à un apprenant incertain de ses conceptions, ou alors différencier un apprenant qui ne tolère pas bien

le doute conceptuel contre un apprenant qui en a absolument besoin pour prospérer intellectuellement, pour progresser cognitivement. Différents mécanismes cérébraux sous-jacents pourraient alors être observés et associés à différents types d'élèves. Enfin, le simple fait de connaître les mécanismes cérébraux impliqués dans le doute pourrait contribuer à des recherches qui s'intéressent justement au rôle exact du doute dans le changement conceptuel en science. Si l'objectif de cette recherche est atteint, toutes ces possibilités s'offrent ainsi aux enseignants et aux chercheurs du domaine.

1.4 Objectif de recherche

À la lumière de l'actuelle problématique, c'est-à-dire la difficulté qu'ont les enseignants à adopter un style pédagogique qui fasse évoluer les conceptions initiales de leurs élèves, la présente étude neurodidactique propose ainsi d'explorer les mécanismes cérébraux impliqués lorsque l'élève doute de ses conceptions initiales et ce, dans le but d'arriver à soutenir d'éventuelles recherches qui voudraient à leur tour explorer de meilleures pratiques pédagogiques suscitant un meilleur engagement cognitif chez l'apprenant, l'idée étant que l'incertitude puisse agir comme élément déclencheur d'une mobilisation des régions cérébrales associées à l'apprentissage.

En somme, l'étude proposée vise à mieux comprendre les mécanismes cérébraux impliqués dans l'incertitude, dans un contexte où les participants font face à des phénomènes scientifiques, autrement dit, à mieux comprendre le rôle du doute dans sa capacité à mobiliser certaines régions cérébrales notoirement associées à l'apprentissage nécessitant un changement conceptuel.

CHAPITRE II

CADRE THÉORIQUE

So what we call scientific knowledge today is a body of statements of varying degrees of certainty. Some of them are most unsure; some of them are nearly sure ; but none is absolutely certain. Scientists are used to this (Feynman, 1998).

An appreciation of the element of the uncertainty in scientific knowledge is typically ignored in teaching and learning of science. Students typically are not learning about the treatment of uncertainty in science and the implications it has for the "durable and tentative nature of scientific knowledge" (Kirch, 2009).

Dans ce chapitre, il sera question à la fois d'explorer différents modèles de changement conceptuel proposés durant les dernières années autant au niveau de la recherche que dans la pratique, l'importance de l'incertitude ainsi que différents aspects liés aux bases biologiques du comportement cognitif d'incertitude. Enfin, c'est à partir de cette base théorique que seront extraites des hypothèses quant aux résultats attendus.

2.1 Le changement conceptuel

Il existe plusieurs théories de l'apprentissage élaborées autant en psychologie qu'en éducation. D'abord le behaviorisme apportait des pratiques liées au façonnement des apprenants, ou à la contingence d'émission de comportement volontaires : l'étudiant doit apprendre à associer un contexte à un comportement, ou une réponse. Quoique

ce courant ait donné plusieurs contributions en termes d'évaluation des apprentissages ou de programmation, par exemples, elle semble peu efficace pour expliquer les processus mentaux qui s'opèrent pendant un apprentissage, ne considérant que ce qui est observable et mesurable. Par contre, le constructivisme, développée par plusieurs chercheurs, dont Jean Piaget, psychopédagogue suisse durant les années 1920 et 1930, offre un cadre conceptuel plus approprié. En réaction au behaviorisme, Piaget expliquait que cette dernière approche ne permettait pas de comprendre les raisonnements plus complexes de l'apprenant à l'extérieur de la simple association stimulus-réponse. De plus, pour Besnier (2005), « le constructivisme désigne d'abord la théorie issue de Kant selon laquelle la connaissance des phénomènes résulte d'une construction effectuée par le sujet ». De ce fait, l'approche constructiviste en éducation accorde une importance à l'activité et à la capacité inhérente de chaque élève d'appréhender la réalité qui l'entoure, et aux processus mentaux sous-jacents. Si l'on s'intéresse aux changements conceptuels des apprenants, le constructivisme semble mieux indiqué.

D'abord, cette approche suppose le premier de deux postulats : les connaissances de chaque élève ne sont pas qu'une simple copie de la réalité, mais plutôt des constructions renouvelées à partir de celle-ci. L'élève n'est donc pas une *tabula rasa* lorsque vient le temps de comprendre un nouveau phénomène, comme l'auraient cru les tenants de l'empirisme classique comme Locke ou Hume ; cette dernière, à tout le moins, aura le bénéfice d'attribuer à l'expérience une place de choix dans l'apprentissage, mais elle diminue l'importance accordée au rôle des conceptions initiales des apprenants dans l'acquisition de nouvelles connaissances puisqu'elle considère que l'apprenant ne possède pas de dispositions initiales.

Ainsi, l'intérêt porté à étudier les mécanismes et processus permettant cette construction de connaissances à partir d'éléments déjà intégrés contribue à la

compréhension du second postulat du constructivisme : la compréhension d'un phénomène se voit donc constamment modifié à chaque nouvelle expérience. L'élève « reconceptualise », voire « restructure » des schémas internes d'informations reçues et emmagasinées à partir de son vécu, en fonction de ses propres concepts initiaux. C'est le phénomène de restructuration conceptuelle à travers les expériences, autrement appelé « changement conceptuel » (Besnier, 2005). Dans cette perspective, il apparaît que comprendre ce qu'est l'apprentissage, c'est comprendre ce qu'est le changement conceptuel (Limon, 2001).

Ainsi, comprendre ce qu'est « apprendre », c'est s'intéresser aux processus par lesquels un apprenant arrive à réorganiser ses schémas initiaux en tenant compte des nouvelles données d'une expérience vécue, s'intéresser aux processus par lesquels l'apprenant arrive à opérer un changement conceptuel. Quoique les différents modèles de changement conceptuel en didactique des sciences soient actuellement remis en question sur le plan méthodologique et qu'un argument d'autorité semble plutôt supplanter la rigueur scientifique quant à la réelle efficacité de ces modèles pour expliquer l'apprentissage (Potvin *et al.* 2013), il s'avère essentiel d'y accorder une importance à ce stade-ci du mémoire, car ce sont eux qui influencent encore les stratégies d'enseignement définies comme problématiques.

2.1.1 Le modèle de Posner *et al.* (1982)

La question qui surgit d'abord concerne la façon dont les conceptions initiales des élèves changent lorsqu'elles sont confrontées à de nouvelles idées ou de nouvelles preuves. Si les conceptions initiales ont besoin d'être modifiées ou remplacées, comme le proposent la plupart des modèles du changement conceptuel développés jusqu'à maintenant (*confer* Posner *et al.*, 1982 ; Vosniadou, 1994 ; Chi, 1992; Duit, 2003), il apparaît clairement que le point de départ d'un changement conceptuel concerne donc ces représentations du monde, ces idées et croyances qu'apporte

l'élève en classe (Limon, 2001). Dans ce sens, Posner *et al.* (1982) envisageaient que le changement conceptuel comporte deux phases distinctes et successives, c'est-à-dire l'*assimilation* et l'*accommodation*, deux termes empruntés et remaniés des théories émises par Piaget : afin d'expliquer l'ensemble d'un nouveau phénomène, l'élève utilise d'abord son paradigme (Kuhn, 1962) ou son « noyau théorique central » (notre traduction libre de l'expression « *theoretical hard core* » de Lakatos, 1970) dans lequel on retrouve l'écologie conceptuelle de l'élève (Toulmin, 1972) : cette écologie est constituée des considérations métaphysiques et épistémologiques de l'élève, des analogies et métaphores qu'il a développées, d'anomalies et d'autres connaissances qu'il a compilées à partir de différents domaines. Dans un premier temps, une assimilation des nouvelles données s'effectue si ces dernières peuvent être reliées aux connaissances actuelles du paradigme de l'élève (Posner *et al.* 1982), laissant croire qu'une certaine altération conceptuelle se soit produite. Par contre, si le paradigme utilisé ne permet pas de saisir adéquatement un nouveau phénomène, l'élève n'aura d'autre choix que de remplacer et de réorganiser les concepts centraux de son paradigme, occasionnant le changement conceptuel le plus drastique appelé « accommodation » (Posner *et al.*, 1982, Strike *et al.* 1982).

Parce que selon ces auteurs, les concepts centraux constituent le véhicule par lequel un ensemble de phénomènes donnés devient intelligible : ces concepts peuvent être liés à des expériences antérieures, des images, ou des modèles qui apparaissent intuitivement suffisamment évidents pour que des concepts compétitifs semblent *a priori* incorrects, voire inintelligibles, d'où l'apparente difficulté à faire évoluer ces concepts initiaux. D'ailleurs, dès que l'on s'intéresse à la compréhension qualitative des connaissances scientifiques, l'étude de ces conceptions devient incontournable, car elle constitue l'étude du modèle personnel qu'un individu possède à propos d'un phénomène scientifique, lequel modèle est utilisé pour interpréter la réalité qui l'entoure (Potvin *et al.*, 2003) et exerce une influence sur la sélection des

informations, le regard que l'individu jettera sur un problème et les solutions qu'il étudiera (Posner *et al.* 1982).

Ainsi, des décennies de recherches en laboratoire de psychologie cognitive ont d'ailleurs bien établi que les connaissances d'un individu influencent non seulement la façon dont il interprète son environnement (Fugelsang et Dunbar, 2005), mais aussi la façon dont il fera le choix d'une stratégie et d'une procédure (Posner *et al.*, 1982). Il semble ainsi que le processus d'accommodation soit celui qu'il faut étudier si l'on cherche à comprendre le changement conceptuel.

Ainsi, plusieurs recherches convergent au sujet des conditions qui permettent à un apprenant d'arriver plus facilement à un apprentissage par accommodation. D'abord, il semble que les nouvelles idées auxquelles sera confronté l'apprenant doivent posséder des caractéristiques précises pour engendrer le déséquilibre cognitif nécessaire à l'accommodation des schèmes initiaux de l'écologie conceptuelle de l'élève (Posner *et al.*, 1982 ; Strike *et al.*, 1982, Hewson *et al.*, 1984). En effet, les concepts à apprendre doivent être d'abord intelligibles pour l'apprenant, plausibles et prolifiques, c'est-à-dire qu'ils soient perçus comme sources de nouvelles possibilités pour expliquer un phénomène. Et selon les mêmes auteurs, parce que l'écologie conceptuelle de l'élève influence la formation de nouveaux concepts, certaines autres caractéristiques de cette dernière semblent aussi nécessaires pour que surgisse un apprentissage par accommodation, entre autres que les conceptions anciennes doivent d'abord apparaître « anormales », c'est-à-dire incapables d'expliquer un phénomène. En somme, pour qu'il y ait changement conceptuel, il semble qu'il faille y avoir insatisfaction des anciennes conceptions et qu'une nouvelle conception concurrente apparaisse comme plus intelligible que la première pour expliquer un phénomène nouveau.

Parce qu'un élève n'aura vraisemblablement intérêt à effectuer un changement majeur par accommodation qu'au moment où il constatera que de plus simples changements (tentatives issues de l'étape d'assimilation) ne suffiront pas à expliquer un phénomène nouveau. À cet effet, pour arriver à l'état de déséquilibre ou d'insatisfaction nécessaire à l'accommodation, un nombre suffisant d'anomalies et de questions sans réponse doivent être accumulées pour qu'une perte de confiance se fasse sentir quant aux capacités d'un paradigme préalable à résoudre un problème ou expliquer un phénomène (Posner *et al.*, 1982). Ce processus dynamique s'effectue souvent sur une longue période de tentatives d'assimilation et d'évaluation (*ibidem*). Ainsi, si l'on s'intéresse aux processus d'acquisition des nouveaux concepts dans un contexte où une insatisfaction est requise pour ébranler le paradigme en place, il implique que l'on doive s'enquérir de connaissances sur la nature d'un tel conflit conceptuel.

2.1.1.1 Le conflit cognitif

D'abord, plusieurs études classiques traitant de changement conceptuel ont reconnu le conflit cognitif comme un point de départ essentiel (Dewey, 1910 ; Festinger, 1957 ; Piaget, 1964 ; Nussbaum et Novick, 1982 ; Hewson et Hewson, 1984 ; Dreyfus, Jungwirth et Eliovitch, 1990 ; Nussbaum et Sinatra, 2003 ; Potvin, Riopel, Masson et Fournier, 2010). Pour ces auteurs, le conflit cognitif consiste à placer l'élève dans une position où ses modèles conceptuels sont mis au défi, comme par l'observation d'anomalies (Strikes *et al.*, 1982, Posner *et al.*, 1982), par l'intermédiaire d'une démonstration théorique en enseignement magistral ou d'une confrontation concrète par l'enseignement à base de problèmes (Potvin *et al.*, 2010). Les nouvelles données ainsi présentées à l'élève l'amènent dans une zone de confusion puisqu'elles ne peuvent pas s'insérer dans les représentations déjà en place du phénomène étudié, puisque les tentatives d'assimilation sont vaines (Posner *et al.*, 1982), amenant donc l'élève dans un conflit cognitif.

Or, parce que les nouvelles données présentées par l'enseignant sont justement difficiles à intégrer par assimilation, un travail cognitif différent émergerait en vue de l'accommodation ; il semblerait qu'il devient aussi difficile pour l'apprenant de les traiter en mémoire de travail (Posner *et al.*, 1982). Le conflit cognitif peut alors demeurer irrésolu, voire passer inaperçu (Hewson *et al.* 1984). D'importantes études ont montré qu'effectivement, cette difficulté à traiter les nouvelles données que l'enseignement tente de faire apprendre pourrait jusqu'à faire en sorte qu'elles soient simplement ignorées par l'apprenant (Hewson *et al.*, 1984), corroborant ainsi une étude contemporaine en neuroimagerie (Fugelsang *et al.*, 2005) où l'on observe une diminution de l'utilisation des ressources cognitives liées à l'attention et à la mémoire de travail dans un contexte de conflit cognitif, un contexte où justement des données non plausibles sont présentées à un individu qui doit traiter l'information en mémoire de travail, sous IRMf.

Cette inhibition observée porte à croire que l'élève serait moins enclin à mobiliser son attention dans le but d'une accommodation, dans ce type de contexte où il y a une confrontation conceptuelle. D'ailleurs, Murray révélait déjà en 1983 que le conflit cognitif peut aller jusqu'à amener l'élève à accepter un paradoxe ou un mystère, ou considérer les données nouvelles comme faisant partie d'un phénomène parallèle. C'est tout dire quant à l'efficacité de telles méthodes pédagogiques : diminution de l'attention porter à la compréhension, encodage et acceptation de faits en bloc sans traitement, création d'ectopie à l'écologie conceptuelle de l'apprenant, comme une association stimuli-réponse. En clair, il semble que lorsque l'élève se trouve confronté à des données qui lui apparaissent non plausibles, son cerveau se désinvestit et traite ces dernières comme des erreurs à ignorer ou à accepter sans réelle intégration conceptuelle.

Cependant, Dole et Sinatra (1998) avancent que seul un niveau élevé d'engagement de la part de l'élève peut conduire au changement conceptuel, par exemple un traitement d'informations profond, l'utilisation élaborée et stratégique d'une réflexion métacognitive, où l'élève réfléchit profondément aux arguments et contre-arguments d'une problématique. Ainsi, la simple confrontation ne semble pas arriver à créer cet engagement cognitif de haut niveau. À ce propos, Nussbaum et Sinatra (2003) relèvent plusieurs recherches qui explorent des prescriptions didactiques faisant, avec succès, la promotion d'un niveau élevé d'engagement, dont l'expérimentation, la lecture de textes réfutationnels l'élaboration d'anomalies et la construction d'explications par l'élève lui-même. Selon ces auteurs, toutes ces techniques ont en commun de nouvelles conditions dans lesquelles le changement conceptuel semble plus propice à survenir:

- (1) Le contexte doit pousser l'élève à partager ses propres explications d'un point de vue alternatif.
- (2) Le contexte doit conduire l'élève à pouvoir juxtaposer de ses idées avec les idées nouvelles.
- (3) Le contexte doit faire la promotion d'une analyse comparative.
- (4) Le contexte doit motiver à trouver des moyens pour réduire/résoudre les inconsistances.

Dans ce genre de contexte, l'élève est amené par lui-même à voir les limites de son écologie conceptuelle suite à un regard métacognitif sur ses ressources pour expliquer un nouveau phénomène, mais sans être directement confronté aux conceptions scientifiques que l'on cherche à lui faire acquérir.

2.1.2 Le modèle de Dreyfus *et al.* (1990)

Ainsi, ce genre de contexte implique la construction d'explications, la possibilité de réfuter certaines explications, de peser les *pour* et les *contre* d'une explication. Ce contexte intègre ainsi l'argumentation comme moyen efficace afin que l'élève arrive à s'engager cognitivement, à rendre visible son raisonnement et à comparer ses conceptions alternatives aux conceptions scientifiques qu'on cherche à faire apprendre. Encore une fois, et selon Dreyfus, Jungwirth et Eliovitch (1990), pour que l'apprentissage d'un nouveau concept s'effectue, l'élève se doit d'être activement impliqué dans le processus de reformation et de reconstruction de ses connaissances, ce qui cadre mieux dans le paradigme constructiviste de ce mémoire. Ces chercheurs proposent ainsi un modèle de changement conceptuel qui s'inspire de leurs prédécesseurs, mais qui s'articule autour du modèle de West et Pines (1984), lesquels conçoivent trois étapes au changement conceptuel : la conscience, le déséquilibre et la reformulation. Le modèle de Dreyfus *et al.* (1990) va donc comme suit :

- **Étape 1** : Identification des conceptions initiales de l'élève par auto-observation métacognitive via une argumentation de style socratique. L'élève est amené à confronter ses idées à celles des autres, jusqu'au point où il reconsidère sérieusement la validité de ses conceptions originales (étape de prise de conscience, traduction libre de « *awareness* »).
- **Étape 2** : Phase de conflit ou d'insatisfaction par rapport aux concepts centraux. Seul le conflit conceptuel amène l'élève à réaliser la nécessité de remplacer et/ou de réorganiser ses concepts centraux (étape du déséquilibre, traduction libre de « *disequilibrium* »).
- **Étape 3** : Création d'un nouveau concept central. Pour y parvenir, le nouveau concept doit à ce stade être perçu comme intelligible, plausible et prolifique (étape de la reformulation, traduction libre de « *reformulating* »).

En somme, ces recherches semblent indiquer qu'il faille effectivement un conflit cognitif pour que l'élève parvienne à reformuler des concepts centraux, donc à effectuer un changement conceptuel, mais que ce conflit doit judicieusement être conçu pour pouvoir observer un impact positif sur l'apprentissage. Au final, le conflit doit être amené par l'intermédiaire d'une argumentation et non pas par confrontation, où l'élève se rend compte par lui-même des lacunes de son modèle, abandonne ses idées erronées et s'ouvre aux idées nouvelles sans avoir l'impression que celles-là sont des erreurs à ignorer, sans créer de nouvelles fausses conceptions parallèles, sans provoquer l'acceptation de mystère ou de paradoxe, et surtout pour mobiliser l'élève à participer activement à sa restructuration paradigmatique que seul un niveau engagement élevé peut produire.

2.1.2.1 Les conceptions initiales

Si le changement conceptuel vise l'altération des concepts initiaux de l'élève pour des concepts scientifiques qu'on tente de lui enseigner, il apparaît donc important de s'intéresser aux dites conceptions initiales de l'apprenant. Plusieurs auteurs se sont penchés sur la nature et les caractéristiques des conceptions dites alternatives, qui sont des conceptions contraires, et donc qui s'opposent, aux conceptions scientifiques que l'on tente de faire apprendre aux élèves. Par exemple, Potvin *et al.* (2003), Potvin *et al.* (2010), Cepni et Keles (2006), Shipstone (1984) ainsi que Duit et von Rhoneck (1998) ont élaboré des modèles de conceptions alternatives erronées. Pour le besoin du présent mémoire, les sept conceptions alternatives majeures de Potvin *et al.* (2010) seront considérées, soient:

- (1) Un seul fil suffit pour allumer une ampoule (*sink theory*) (Duit et von Rhoneck, 1998 ; Shipstone, 1984 ; Thouin, 2008).
- (2) Un pôle de la pile est une source de courant électrique alors que l'autre pôle recapture l'excès de courant ou le courant utilisé (Potvin *et al.*, 2010).

- (3) Deux courants différents se rencontrent et s'entrechoquent dans l'ampoule (*clash theory*) (Shipstone, 1984).
- (4) Il n'est pas nécessaire que le courant retourne à la source pour allumer une ampoule (Shipstone, 1984).
- (5) Une ampoule consomme le courant. Une deuxième ampoule reliée en série avec la première brillera ainsi moins que la première (Shipstone, 1984 ; Thouin, 2008).
- (6) Un nœud ou un long fil sont des obstacles substantiels à la circulation du courant (Potvin *et al.*, 2010).
- (7) Le courant se distribue également dans les circuits connectés en parallèle (Potvin *et al.*, 2010).

À propos de ces conceptions alternatives erronées, ces mêmes auteurs ont d'ailleurs soutenu que le paradigme du changement conceptuel en science avait trop mis l'accent sur la nature et la fréquence des conceptions initiales de l'élève, et ce, dans le but d'établir des stratégies de changement conceptuel qui cherchent à les désamorcer (Potvin *et al.*, 2003). Potvin *et al.* (2003) ont aussi exprimé le constat que malgré l'enthousiasme que ces études ont apporté (Novak, Wanderse et Mintzes, 1994 ; Posner *et al.*, 1982 ; Strike *et al.*, 1982 ; Hewson *et al.*, 1984), le succès du changement conceptuel demeure relatif, d'où le constat que toutes ces années de recherches ne montrent que des résultats équivoques, remettant en question l'étude des conceptions comme objet valable de recherche.

Ainsi, c'est par l'entretien d'explications comme le décrit Vermersh (1994) que ces chercheurs ont voulu mettre en évidence les procédures exercées et mobilisées par les élèves participant à la recherche. C'est à partir des verbalisations d'élèves sur des phénomènes de physique observés à l'intérieur d'un programme informatique que Potvin *et al.* (2003) ont ainsi découvert que dans ce genre de contexte, les élèves

abandonnent plus facilement (qu'on l'avait jusqu'alors cru possible) leurs concepts centraux anormaux ou alternatifs lorsqu'ils constatent par eux-mêmes leurs anomalies pour décrire les phénomènes observés. Ces chercheurs ont ainsi pu identifier et caractériser le déroulement typique des séquences d'explorations libres, c'est-à-dire dans un contexte où les apprenants sont placés devant un phénomène scientifique qu'ils ne peuvent d'emblée expliquer, mais où ils ont tout l'espace voulu pour en discuter et trouver l'explication scientifique. Voici ce que ces chercheurs ont observé :

- **Temps 1 : initiatives d'exploration.** Un certain nombre de conceptions se manifestent. Tentatives de prédictions.
- **Temps 2 : période brève de conflit cognitif.** Les prédictions s'avèrent stériles. Stupéfaction, réaction inattendue. Disparition des conceptions initiales des discours des apprenants.
- **Temps 3 : épisode de confusion.** Exploration intuitive, basée sur les impressions. Utilisation d'autres connaissances liées à d'autres domaines (mathématique, géométrie). Peu de verbalisation sur la signification physique. Cette étape occupe 85 % du temps d'entrevue.
- **Temps 4 : nouveaux essais de prédiction.** Une certaine logique apparaît et semble expliquer avec succès les phénomènes observés. Formulation de nouvelles conceptions.

Selon Potvin *et al.* (2003), et ce, dans un contexte d'explorations libres, peu importe la complexité de la tâche, les élèves n'ont en général aucune difficulté à abandonner leurs anciennes conceptions pour en formuler de nouvelles à partir des résultats qu'ils obtiennent. Les nouvelles conceptions apparaissent rapidement et sont formulées avec autant de certitude que les anciennes. Ces auteurs en concluent qu'il s'avère donc relativement facile d'opérer un changement conceptuel à court terme.

Qui plus est, c'est au *Temps 3* que devraient se concentrer les efforts didactiques, alors que l'élève est en position de confusion et qu'il tente en quelque sorte, par essais et erreurs, de bonifier les conceptions initiales manifestées au *Temps 1* (Potvin *et al.*, 2003), laissant croire à une phase de tentatives d'assimilation vers l'accommodation telle que décrite précédemment. L'incertitude qui apparaît au *Temps 2* semble ainsi occasionner une stupéfaction et un abandon des conceptions initiales, d'où l'importance de mieux comprendre comment susciter l'incertitude pour amener l'élève au *Temps 3* (phase d'exploration) et donc à l'engagement cognitif nécessaire au changement conceptuel.

Une autre contribution de ces auteurs se situe lorsqu'ils analysent l'itinéraire cognitif, et en déduisent qu'il y a absence de fil conducteur entre les *Temps 1* et *Temps 4*, laissant croire que les conceptions semblent jouer un rôle secondaire, qu'elles permettraient probablement de suivre la compréhension ponctuelle d'un élève, et qu'elles semblent donc utiles pour décrire le changement conceptuel en tant que processus, pour suivre l'évolution de ses conceptions. Cette considération sera importante pour ce mémoire alors qu'il sera question d'établir des conditions expérimentales. Les conceptions initiales erronées (*Temps 1*), l'absence de conception (*Temps 2* et *Temps 3*) et les conceptions scientifiques (*Temps 4*), et leurs différentes manifestations en lien avec le niveau d'incertitude (*Temps 1* = certain ; *Temps 2* et *Temps 3* = incertain ; *Temps 4* = certain) représenteront donc le processus de changement conceptuel par lequel un apprenant arrive aux connaissances que l'on tente de lui faire apprendre.

2.2 L'incertitude

Quoique le niveau d'incertitude puisse montrer où en est rendu l'élève dans son processus de changement conceptuel, dans le domaine de la recherche en éducation à la physique, l'usage d'échelle de certitude n'est pas chose courante (Planinic, Boone,

Krasnik et Beilfuss, 2006). Certains auteurs ont tantôt utilisé des échelles de Likert pour estimer la force des conceptions alternatives des élèves (par exemple : Oliva, 1999), tantôt des échelles de certitude ou « *certainty response index* » (CRI) pour distinguer les items pour lesquels les élèves utilisent des conceptions alternatives, des conceptions scientifiques ou un manque de connaissances (Hasan, Bagayoko et Kelley, 1999 ; Planinic *et al.*, 2006; Potgeiter, Malatje, Gaigher et Venter, 2010). Dans ces quelques rares études traitant de l'incertitude en éducation scientifique, les chercheurs ont essentiellement utilisé ces échelles pour leur propre impression diagnostique, laissant en plan le rôle de cette incertitude dans le changement conceptuel. Encore une fois, l'accent était plutôt mis sur l'identification, la classification et la caractérisation des conceptions alternatives, initiales ou erronées des élèves. Toutefois, le *Tableau 2.1* montre en quoi ces études nous permettent quand même de saisir l'importance d'étudier le rôle de l'incertitude dans le changement conceptuel, car c'est à ce moment que l'élève n'éprouve plus de certitude à l'égard de connaissances erronées et qu'il se dirige vers la connaissance scientifique. Dans ce tableau, les performances des élèves (bonne ou mauvaise réponse) ont été couplées à une donnée supplémentaire, c'est-à-dire le degré de certitude émis par les participants, alors qu'ils indiquaient être « certains » ou « incertains » de la véracité d'un stimulus (par exemple : stimulus correct + je suis certain). Le modèle d'Hasan (1999) permet de mieux comprendre ce qui sous-tend cognitivement l'activité intellectuelle à chacun de ces moments.

Tableau 2.1 – Couplage de performances, du niveau de certitude et modèle d'Hasan (1999)

Performances réelles	Réponses données (stimulation correcte ou incorrecte versus niveau de certitude)	Interprétations (modèle d'Hasan, CRI, 1999)
BONNE RÉPONSE	Correct – Certain	Connaissance adéquate
	Correct – Incertain	Manque de connaissance
	Incorrect – Certain	Connaissance adéquate
	Incorrect – Incertain	Manque de connaissance
MAUVAISE RÉPONSE	Correct – Certain	Conception alternative
	Correct – Incertain	Manque de connaissance
	Incorrect – Certain	Conception alternative
	Incorrect – Incertain	Manque de connaissance

Grâce aux travaux d'Hasan (1999), ce n'est qu'en situation d'incertitude que l'élève constate son manque de connaissance pour arriver à la certitude d'une explication, que celle-ci soit scientifique ou alternative : en clair, l'incertitude est l'état que tout didacticien souhaite faire vivre à ses élèves puisqu'elle est le seul état qui montre que l'élève prend conscience des limites de son écologie conceptuelle, d'un manque de connaissance, comme les *Temps 2* et *Temps 3* relatés par Potvin *et al.* (2003). Ainsi, dans un contexte de réponse erronée, tant que l'élève est certain de sa réponse, il ne peut prendre conscience des limites des conceptions sur lesquelles il s'appuie pour émettre sa certitude. Émettre une certitude ou une incertitude devient ainsi une mesure de l'état en cours du changement conceptuel. À ce stade, il s'avère pertinent de s'interroger sur ce qu'est exactement l'incertitude.

2.2.1 L'incertitude dans la recherche

Il y a maintenant plus de 40 ans, Tulving et Madigan (1970) notaient dans leur revue de la littérature qu'une caractéristique importante de la mémoire humaine est sa capacité de connaître ce qu'elle connaît. Ces auteurs expliquaient ainsi qu'aucun individu ne peut d'abord conceptualiser sans faire une estimation de sa capacité de

conceptualisation. Plusieurs chercheurs ont par la suite exprimé une certaine réserve quant à ce postulat, proposant que certains individus soient limités dans cette capacité de vigilance quant à leurs connaissances, ou *monitoring* (Koriat, 1993). Une explication possible pourrait trouver racine en 1933 lorsque Dewey suggérait que la résolution d'un problème était catalysée par un sens du doute, lequel permettait l'arrêt de toutes actions routinières, des automatismes : certains auraient peut-être plus de mal que d'autres à prendre conscience de ces automatismes.

2.2.1.1 L'incertitude comme catalyseur métacognitif

En effet, des travaux subséquents en psychologie cognitive (Posner, Gregory et Fernandez-Duque, 1997) ont montré qu'une habileté cognitive emprunte des circuits neuronaux différents, qu'elle soit en voie d'acquisition ou qu'elle soit maîtrisée via la pratique. Pour Posner *et al.* (1997), cela explique en quoi les novices et les experts d'un domaine diffèrent entre eux, mais surtout qu'une fois acquise, une habileté s'automatise cognitivement pour échapper au *monitoring* cognitif. Pour mieux comprendre ce qu'est le « *monitoring* », Koriat et Goldsmith (1996) expliquent qu'il s'agit d'une capacité ponctuelle de réflexion sur le succès ou le potentiel de succès des efforts de repêchage d'informations en mémoire. Lorsque l'on reconsidère ce que Dewey avait suggéré quant au pouvoir du doute comme catalyseur cognitif, maintenant à la lumière des recherches de Posner *et al.* (1997) sur l'automatisation des processus cognitifs, on peut comprendre que l'incertitude permettrait de remobiliser l'attention de l'apprenant sur des habiletés devenues acquises et automatisées par la pratique et la répétition; ces habiletés acquises soumises au « *monitoring* » les rendent dès lors plus sujettes à modification. Dans un tel cas, l'incertitude devient partie intégrante d'un processus métacognitif (Fernandez-Duque, Baird et Posner, 2000; Ferreira, Garcia-Marques, Sherman et Sherman, 2006). La régulation métacognitive réfère au processus qui coordonne la cognition et qui travaille de concert avec les fonctions exécutives, lesquelles impliquent notamment

l'habileté à exercer une vigilance (traduction libre de « *monitoring* ») et un contrôle sur le traitement des informations nécessaire à la production d'une réponse volontaire (*ibidem*). En d'autres termes, ces auteurs indiquent que les fonctions exécutives et la métacognition contrôlent et guident les actions lorsqu'il n'y a pas de schème préétabli d'actions en fonction d'un but : elles sont recrutées par le cerveau lors d'actions non routinières pour prendre des décisions, résoudre des conflits et sélectionner une stratégie dans des contextes où il y a indéniablement de l'incertitude.

Ainsi, l'incertitude apparaît ici comme le catalyseur d'une chaîne de réactions métacognitives dans des contextes de prise de décision, probablement aussi lorsqu'il y a un conflit cognitif menant vers le changement conceptuel. Dès lors, une première définition qui mérite d'être citée provient des travaux d'Anderson, Deane, Hammond et McClelland (1981) qui soutiennent l'idée que l'incertitude émerge d'une situation dans laquelle un individu n'a pas suffisamment de connaissances à propos de l'état d'une chose pour l'expliquer ou prédire son évolution. Cette définition jette les bases conceptuelles à deux contextes qui concernent la présente recherche, c'est-à-dire la prise de décision d'une part, et quant à des contenus scolaires d'autre part.

2.2.1.2 L'incertitude dans un contexte de prise de décision

Ainsi, il apparaît pertinent de discuter des différentes recherches qui se sont intéressées à l'incertitude dans la prise de décision, parce que répondre correctement à des questions scientifiques est un défi considérable pour la plupart des élèves et, à un certain degré, est souvent tributaire du succès ou de l'échec scolaire. La difficulté à prendre des décisions dans un examen, par exemple, peut être expliquée par le fait que plusieurs conceptions entrent en compétition, c'est-à-dire les conceptions naïves, erronées, intuitives ou scientifiques lors de la sélection la bonne réponse dans un choix multiple (Potvin, Turmel et Masson, 2014). Dès lors, l'incertitude peut constituer un obstacle majeur à l'efficacité d'une prise de décision (Dreyfus *et al.*,

1984 ; Lipshitz *et al.*, 1997 ; Potvin *et al.*, 2010). En ce sens, Lipshitz *et al.* (1997) proposèrent une définition selon laquelle l'incertitude, dans un contexte d'action, est la sensation de doute qui bloque ou retarde ladite action. Smith, Benson et Curley (1991) suggère plutôt que l'incertitude soit un état d'indécision (le fait d'être indécis) qui résulterait d'une lutte sans issue entre des alternatives concurrentes. Il apparaît que plusieurs auteurs aient chacun leur conceptualisation de ce qu'est l'incertitude, probablement selon leur contexte expérimental. Malgré que l'intérêt d'étudier le doute lors de la prise de décision soit plutôt récent en neurobiologie (Volz, 2005), que les mécanismes soient toujours difficiles à saisir et que par conséquent plusieurs théories coexistent quant à la prise de décision sous incertitude chez l'humain (*ibidem*), la contribution d'autres disciplines (ici l'éducation) offre d'autres possibilités intéressantes, un autre point de vue. Parce qu'en effet, plusieurs études dans le domaine de la prise de décision sous incertitude utilisent de situations expérimentales qui ne trouvent que peu de lien avec le contexte scolaire, tantôt parce qu'elles créent de l'incertitude chez leurs participants en modulant le niveau d'ambiguïté des stimuli (Huettel, Song et McCarthy, 2005), tantôt parce qu'elles créent de l'incertitude en modulant la probabilité qu'un événement se produise (Critchley, Mathias et Dolan, 2001 ; Krain *et al.*, 2006 ; Volz, Schubotz et von Cramon, 2003). Quoique certains liens peuvent être établis entre ces contextes d'incertitude et ceux vécus par l'apprenant lors d'un apprentissage nécessitant un changement conceptuel, ces contextes expérimentaux retrouvés dans la littérature apparaissent suffisamment éloignés du contexte de la classe pour nécessiter d'autres recherches à l'aide de contenus expérimentaux impliquant des contenus d'apprentissage scientifiques.

2.2.2 L'incertitude en contexte scolaire

Dès lors, l'incertitude qui intéresse la présente recherche s'inscrit dans un contexte de changement conceptuel où l'élève se doit d'être ébranlé quant à ses concepts centraux

et où il mobilise sa métacognition pour prendre conscience des anomalies ou limites de ces derniers pour désautomatiser sa pensée. Kirch (2009) publia un article en contexte d'enseignement des sciences au primaire dans lequel il définit l'incertitude comme étant la condition psychologique d'être sans conviction devant de l'information. Quoique cette définition raffine davantage le concept d'incertitude en science, elle n'arrive pas à montrer la dynamique de cette dernière en relation avec d'autres instances cognitives.

Il fallut donc attendre la recherche de Potvin *et al.* (2010), lesquels ont étudié la dynamique du doute dans l'enseignement de la physique au secondaire, pour mieux saisir l'importance du doute dans l'apprentissage. Pour eux, le doute et l'incertitude occupent une partie importante de la cognition humaine, influençant les performances académiques d'autres aspects de l'apprentissage comme la motivation et les attitudes, ainsi que les apprentissages futurs (Potvin *et al.*, 2010). Ces chercheurs se sont ainsi penchés sur le rôle du doute dans deux contextes différents d'enseignement, c'est-à-dire l'enseignement classique basé sur la transmission systématique de contenus et l'enseignement basé sur la résolution de problèmes concrets ou de manipulation. Leurs conclusions montrent que l'élève qui possède une position initiale forte par rapport à ses conceptions, c'est-à-dire qui exprime le plus de certitude initiale, bénéficie davantage d'un enseignement basé sur la résolution de problèmes concrets puisque l'élève constate par lui-même, et dans l'action, les anomalies et limites de son écologie conceptuelle, et donc de leur incapacité à résoudre les problèmes dans la réalité. Selon Dreyfus *et al.* (1984), ce genre d'élèves semble bien réagir au conflit cognitif et cette attitude leur permet de développer une conscience de leurs concepts initiaux lorsque confrontés à la réalité. Ainsi, l'incertitude dans un contexte de résolution de problèmes semble exercer des effets positifs sur le changement conceptuel chez les élèves qui montrent une position initiale claire dont ils sont certains.

Par ailleurs, Potvin *et al.* (2010) ont émis l'hypothèse que l'élève qui n'a pas de position initiale solide sur le plan conceptuel, donc qui exprime davantage de doute initial, semble bénéficier d'un enseignement plutôt traditionnel dans lequel il peut acquérir les connaissances manquantes de façon dirigée sur lesquelles il pourra assurer une certitude puisqu'elles viennent de l'enseignant. Ce genre d'élèves bénéficieraient aussi du type d'enseignement par problèmes concrets, mais seulement lorsque les hypothèses et la démarche sont données par l'enseignant. Selon Dreyfus *et al.* (1984), ces élèves semblent démontrer une certaine insécurité devant la tâche, une anxiété qui s'avère réduite dans un environnement dirigé où ils n'ont qu'à faire ce que l'enseignant propose et ainsi plaire à ses attentes en donnant les bonnes réponses et obtenir un renforcement positif. Par contre, l'incertitude initiale de ces élèves ne semble pas apporter l'effet souhaité sur le changement conceptuel. Ces recherches portent ainsi à croire qu'il y a différents types d'incertitude exerçant différents impacts sur les stratégies de compensation, l'apprentissage et le changement conceptuel. L'étude de Morenluoto et Lehtinen (2002), suite à l'analyse de l'expression de l'incertitude de participants dans des tâches en mathématique, supporte d'ailleurs cette idée de diversité lorsqu'elle conclut que les performances et la certitude sont souvent proportionnelles – plus un élève est certain, mieux il performe –, sauf pour les élèves qui performent le mieux, lesquels sont aussi incertains que ceux qui performent le moins et ce, plusieurs mois après l'apprentissage initial ; avec des résultats témoignant donc du changement conceptuel réel. Ainsi, toutes ces études démontrent qu'en fin de compte, plusieurs types d'incertitude peuvent coexister dans une même classe, et que l'incertitude serait liée à différents types de stratégies d'apprentissage et de performance. Voyons maintenant comment déterminer le type d'incertitude impliquée dans le processus métacognitif décrit précédemment et qui intéresse particulièrement cette recherche.

2.2.2.1 Deux types d'incertitude

À cet effet, il existe plusieurs recherches impliquant l'incertitude dans leur protocole expérimental. D'abord, Potvin *et al.* (2010) firent référence à deux types de doute, c'est-à-dire le doute par rapport à ses propres capacités à répondre, et le doute comme motivation à comprendre les phénomènes scientifiques, lequel se développe et s'apprend. Ces mêmes chercheurs conviennent que le premier type de doute peut être identifié par des tests standardisés d'estime de soi, par exemple, et ne concerne pas le cadre de la recherche actuelle puisque ce type de doute relève plutôt d'une disposition psychologique de l'apprenant. Ce type de doute n'intéresse donc pas l'actuelle recherche. En ce qui a trait au deuxième type de doute, il peut être identifié dans le contexte où l'élève peut exprimer son incertitude par rapport à ses réponses. En somme, s'il existe deux types d'incertitude, celui qui semble le plus approprié dans le cadre de cette étude est celui qui concerne non pas le doute lié à la capacité de répondre de l'élève, mais bien celui lié à son écologie conceptuelle. À ce propos, plusieurs études en neuropsychologie ont mis l'accent sur l'incertitude dans différents contextes pour justement différencier les signatures cérébrales de ces deux types d'incertitude.

2.2.3 Bases biologiques de l'incertitude

Dans le domaine des neurosciences cognitives, Volt, Schubotz et von Cramon (2004) ont réalisé une étude en neuroimagerie qui révèle que deux types précis d'incertitude montraient deux différents types d'activations cérébrales : d'attribution interne et d'attribution externe. Selon Volz *et al.* (2004), l'incertitude d'attribution externe se produit lorsque l'individu croit qu'elle est due à des éléments extérieurs qu'il ne peut pas contrôler, par exemple un manque de connaissances sur la probabilité qu'un événement se produise. Or, l'objet de l'incertitude d'attribution interne porte plutôt sur son écologie conceptuelle, et se produit lorsque l'individu croit qu'elle est due à un manque de connaissances, d'arguments, d'introspection ou de confiance à l'égard

de croyances personnelles ou de connaissances antérieures. Il apparaît ainsi que ce dernier type d'incertitude concorde avec l'intérêt de cette recherche, c'est-à-dire l'incertitude qu'un apprenant ressent à l'égard de son écologie conceptuelle. Ainsi, dans le cas de l'incertitude d'attribution interne, l'activation cérébrale devrait être caractérisée par une recherche d'informations en mémoire, alors que dans le cas de l'incertitude d'attribution externe, le cerveau est caractérisé par une tentative de calcul des probabilités d'apparition de l'événement, d'où l'activation du cortex cingulaire antérieur, une région associée à la détection des erreurs observées dans l'environnement. Les signatures cérébrales de chaque type d'incertitude seront par la suite des manifestations de stratégies de compensation employées par le cerveau pour réduire ces deux différents types d'incertitude, ce qui concorde avec la diversité d'incertitudes, ainsi que son impact sur les différents styles d'apprentissage et de performance en sciences décrits à la section précédente.

Concrètement, les résultats de la recherche Volz *et al.* montrent clairement qu'en cas d'incertitude d'attribution interne et externe, le cerveau est d'abord activé à partir d'une même région commune, c'est-à-dire l'aire de Brodmann 8 (ou BA 8), et que dans un deuxième temps, d'autres régions s'activent en fonction du type de stratégies de compensation (traduction libre de « *coping strategy* ») à déployer selon le type d'incertitude en jeu. En effet, Volz *et al.* (2005) se sont inspirés des travaux de Kahneman et Tversky (1982) pour suggérer deux stratégies de compensation typiques visant à résoudre ces deux types d'incertitude. Donc, peu importe le type d'incertitude exprimé par le participant, que ce soit d'attribution interne ou externe, l'aire de Brodmann 8 mésiale (BA 8) s'active en premier. Cette aire se situe dans les lobes frontaux, une région aussi appelée cortex fronto-médian postérieur (Volz *et al.*, 2005). Selon Volz *et al.* (2004), à ce stade, certaines co-activations peuvent aussi être observées en fonction du contexte expérimental duquel est issue l'incertitude. Cela dit, afin de former une hypothèse sur les bases biologiques liées au type d'incertitude

étudié dans la recherche actuelle, une attention sera portée sur la façon dont chaque tâche a été conçue dans certaines recherches spécifiques susceptibles d'inspirer les résultats attendus. Parce qu'en effet, certaines études en neuroimagerie ont constaté trois modulateurs précis dans l'activation liée à l'incertitude : la cause de l'incertitude, son effet et la stratégie de compensation associée (voir Volz *et al.*, 2005). À ce propos, Volz *et al.* (2005) exposent ainsi qu'une incertitude d'attribution interne est reliée à une plus vaste activation que celle d'attribution externe, partant de la BA 8 mésiale jusqu'aux limites de la BA 9.

2.2.3.1 Incertitude d'attribution interne et contextes

Selon Volz *et al.* (2005), certaines tâches cognitives suscitant une incertitude d'attribution externe co-activent les régions BA 32/24 (associées au cortex cingulaire antérieur), la région BA 6 (associée à l'aire motrice pré-supplémentaire) ainsi que la région BA 46/9 (correspondant au cortex préfrontal dorsolatéral). Selon les mêmes auteurs, ces activations surgissent uniquement dans les contextes suivants :

- (1) La règle d'association stimulus-réponse est simple et préalablement apprise.
- (2) Deux réponses sont activées simultanément dans le cerveau, occasionnant un conflit au niveau de la réponse à émettre.
- (3) Les erreurs sont habituellement provoquées par une pression du temps ou une difficulté de perception.
- (4) L'intensité du conflit peut diminuer si le participant examine bien le stimulus.
- (5) La rétroaction permet d'améliorer la performance sur les plans moteur et perceptuel.

Or, ces contextes se retrouvent plus souvent dans des tâches s'apparentant, par exemple, au test d'inhibition Stroop, ou au « *Go-No-Go* » d'Eriksen (1970). Dans

ces études, le cortex cingulaire antérieur est constamment cité comme agent de monitoring d'erreurs. Ce type d'incertitude est donc plutôt lié à l'inhibition de réponses face à des stimuli.

En contraste, Volz *et al.* (2005) observent que l'activation du cortex cingulaire antérieur est typiquement absente dans des tâches comprenant un conflit, certes, mais aussi :

- (1) Des règles d'association stimuli-réponses plurielles.
- (2) Un conflit au plan des connaissances.
- (3) Les erreurs ne sont pas induites par une contrainte de temps, mais par une difficulté cognitive.
- (4) Le conflit peut-être diminué par une recherche en mémoire (« *monitoring* »).
- (5) La rétroaction améliore la performance sur le plan des habiletés et des connaissances.

Selon le contexte actuel de la recherche et dans lequel on met l'accent sur l'incertitude de l'écologie conceptuelle, il semble que le deuxième type de contexte s'approche de façon plus appropriée à celui dans lequel on cherche à étudier l'incertitude en didactique des sciences, puisqu'il sollicite les connaissances antérieures de l'apprenant, que le conflit se crée sur le plan de ces dernières et que les erreurs de réponse ne reflètent pas une pression de temps, mais plutôt une difficulté cognitive, ce qui exclurait l'activation du cortex cingulaire antérieur et l'idée d'un conflit cognitif par confrontation étant donné qu'aucun feedback ne pourra être donné aux participants suite à leurs réponses. Ce type d'incertitude sera donc considéré comme étant de type conceptuel pour le reste de ce mémoire.

2.2.3.2 Patrons d'activation des stratégies de compensation : le « *monitoring* »

Comme le mentionnaient Henson, Shallice et Dolan (1999), ainsi que Shallice (2001), les lobes frontaux comportent des réseaux de neurones critiques dans le « *monitoring* » de la mémoire de façon générale. Considérant que l'incertitude d'attribution interne suppose des stratégies métacognitives de « *monitoring* », les études de Huettel, Song et McCarthy (2005) permettent de développer une hypothèse quant à l'activation cérébrale probable dans le présent devis de recherche.

En effet, leurs résultats montrent que l'incertitude découlant d'une association stimulus-réponse simple module l'activation du cortex fronto-médian (CFM), ce qui rappelle le premier contexte d'attribution externe élaboré par Volz *et al.* (2004). Par contre, leurs résultats montrent aussi que l'incertitude découlant d'une accumulation d'informations à court terme dans le but de prendre une décision module l'activation du cortex préfrontal dorsolatéral (CPFDL) et le cortex pariétal postérieur (CPP). Ces deux structures sont respectivement associées au *monitoring* (CPFDL) et au stockage d'informations à long terme (CPP), ce qui suggère que le cortex fronto-médian (CFM) et le cortex préfrontal dorsolatéral (CPFDL) conjointement activés avec le cortex pariétal postérieur (CPP) jouent des rôles complémentaires en situation de modulation de l'incertitude d'attribution interne.

Aussi, les travaux de Henson, Rogg, Shallice et Dolan (2000) indiquent que le cortex préfrontal dorsolatéral droit est particulièrement activé en situation d'incertitude. Ces chercheurs font une distinction entre le repêchage d'informations et le *monitoring* de repêchage d'informations. Selon eux, le processus métacognitif de *monitoring* s'effectue précisément dans le contexte où le participant émet une réponse incertaine, mais correcte : c'est dans ce contexte spécifique qu'est associé le cortex préfrontal dorsolatéral droit. De plus, les résultats de ces mêmes chercheurs montrent que d'autres régions sont activées selon que l'item de la tâche concerne une connaissance

nouvelle ou ancienne : s'il concerne une nouvelle connaissance, ce sont les régions préfrontales antérieures bilatérales qui sont activées, alors que si l'item de la tâche concerne d'anciennes connaissances, le précunéus, le cortex cingulaire postérieur ainsi que le cortex pariétal latéral gauche montrent une plus grande activation.

2.2.4 Définition de l'incertitude

Dans le contexte de cette recherche, l'incertitude d'intérêt, c'est-à-dire l'incertitude impliquée dans le conflit cognitif pouvant mener à un changement conceptuel, regroupe les caractéristiques suivantes relatées par Volz *et al.* (2003 ; 2004 ; 2005) :

- (1) **Nature** – L'incertitude est un état psychologique ressenti par le sujet.
- (2) **Objet** – L'incertitude est d'attribution interne de type conceptuel, c'est-à-dire par rapport à ses conceptions initiales.
- (3) **Source** – L'incertitude émerge d'une absence de conviction dans un contexte d'action (une prise de décision) où des conceptions sont en compétition ou que les alternatives sont indifférenciées.
- (4) **Conséquence** – L'incertitude est suivie de stratégies métacognitives de compensation, c'est-à-dire la recherche d'informations dans la mémoire et la vigilance cognitive (ou « *monitoring* »).

2.2.3.3 Hypothèses des bases biologiques de l'incertitude d'attribution interne

Ainsi, cette recherche visant à identifier les mécanismes cérébraux impliqués dans l'incertitude d'attribution interne propose les deux hypothèses suivantes.

D'une part, l'incertitude montrera un patron d'activation différent de la certitude. D'autre part, les mécanismes cérébraux des deux types d'incertitude identifiés, soient d'attribution interne et externe, seront présents.

À cet égard, il est attendu que l'incertitude d'attribution interne mobilise des régions du cortex préfrontal (dorso-latéral ou CPFDL), du cortex frontal (médian ou CFM) et du cortex pariétal (postérieur ou CPP). Enfin, l'incertitude d'attribution externe mobilisera une région précise du système limbique (cortex cingulaire antérieur ou CCA) et l'aire prémotrice supplémentaire.

Autrement dit, lorsqu'un participant sera dans un état d'incertitude d'attribution interne, un état d'incertitude considérée par Volz *et al.* (2004) comme étant un type d'incertitude émergeant d'un conflit au niveau des connaissances lors d'une prise de décision (être incertain de ce que l'on sait à propos du stimulus), les activations du CPFDL, du CPP et du CFM sont attendues. Toutefois, lorsqu'un participant sera dans un état d'incertitude d'attribution externe de type association stimulus-réponse, et que l'incertitude se situe d'abord sur le plan du conflit de réponses à émettre plutôt qu'au plan des conceptions elles-mêmes (être incertain de la réponse à émettre ou du bouton à appuyer), les activations des zones du cortex cingulaire antérieur (BA 24/32) et de l'aire prémotrice supplémentaire sont attendues.

CHAPITRE III

CADRE MÉTHODOLOGIQUE

Cette section du mémoire concerne les aspects méthodologiques de la recherche. Il y sera ainsi question de discuter des choix qui ont été faits à propos de la sélection des participants, de l'instrument de mesure, ainsi que du déroulement et des paramètres d'acquisition des données. S'ensuivront les étapes préparatoires essentielles à l'analyse des données en IRMf, pour terminer sur les considérations éthiques du projet de recherche.

3.1 Les participants

Pour plusieurs considérations importantes qui seront explicitées dans les prochaines sections, quatre critères ont été retenus pour sélectionner les participants.

3.1.1 Critères de sélection des participants

Premier critère : le parcours scolaire

La présente recherche s'intéresse aux mécanismes cérébraux impliqués dans l'incertitude lors du changement conceptuel chez le novice ; l'un de ces critères de sélection concerne ainsi le parcours scolaire. En effet, pour la sélection des participants, le recrutement a eu lieu dans trois institutions collégiales de la région montréalaise auprès de jeunes hommes et de jeunes femmes admis dans un programme autre que celui des sciences de la nature (en l'occurrence sciences

humaines, danse, art dramatique et éducation à l'enfance), et qui ont été sélectionnés sur la base d'un parcours libre de cours en sciences naturelles depuis leur sortie du secondaire. Malgré que la tâche à laquelle seront soumis les participants ne permette pas d'observer le changement conceptuel en soi, il s'avérerait important de choisir des participants qui n'avaient pas revu de notions scientifiques depuis leurs études secondaires afin d'optimiser la représentativité des résultats en ce qui a trait à des étudiants novices, comme ceux que l'on retrouve dans les classes d'éducation scientifique en début de parcours. La participation d'étudiants issus de programmes collégiaux non scientifiques s'avère ainsi un choix qui favorisera le développement de connaissances sur le raisonnement d'apprenants novices.

Deuxième critère : l'âge et la maturité du cerveau

Comme critère de sélection, l'âge du participant est un moyen de cibler des participants possédant un niveau de maturation similaire, et donc une façon de diminuer la variabilité entre les sujets. En effet, trois recherches (Gorgio, Watkins, Chadwick, Winmill, Douaud, De Stefano, Matthews, Smith, Johansen-Berg et James, 2009 ; Sowell, Delis, Stiles et Jernigan, 2001 ; Segalowitz et Davies, 2004) montrent que le cerveau subit durant l'adolescence d'importants changements microstructuraux, ainsi que de densité des matières blanche et grise, notamment au niveau des lobes frontaux et sur le plan de leur connectivité avec le reste du cerveau. Selon ces auteurs, ces changements sont la manifestation d'un processus de maturation normal qui se termine vers la fin de la vingtaine, et qui influence différents processus qui intéressent la présente recherche : les processus de raisonnement et d'utilisation de la mémoire de travail.

Ainsi, le recrutement s'adressait à des jeunes majeurs âgés de 18 à 20 ans maximum, et ce, pour deux raisons ; d'abord pour améliorer les possibilités de généralisation des résultats à la population des jeunes novices qui n'ont justement pas terminé ce

processus de maturation cérébrale, puis pour des raisons éthiques puisqu'ils pouvaient directement donner leur consentement. Rappelons que seulement 36 % des jeunes de 18 ans et plus, et que 20 % de ceux de 19 ans mobilisent des conceptions scientifiques sur l'électricité pour expliquer des phénomènes électriques contre 50 % chez les jeunes de 16 ans (Cepni *et al.*, 2006 ; Shipstone, 1988). C'est sur cette base que des participants plus âgés ont été recrutés, pour s'assurer qu'un laps de temps suffisant se soit écoulé et que prédominent à nouveau les conceptions alternatives, comme des apprenants novices.

Troisième critère : l'absence d'un trouble d'anxiété

Toujours afin de favoriser l'observation des différences statistiquement significatives en lien avec les variables étudiées, il a fallu créer un groupe d'individus dont la variabilité entre sujets soit la moins possible attribuable à des variables étrangères au problème. Dans la majorité des recherches incluant un devis en imagerie cérébrale, des précautions sont prises pour différencier les *sujets sains* (notre traduction libre de l'expression « *healthy subject* ») d'autres sujets pouvant présenter des différences importantes au niveau de l'activité ou des structures cérébrales ; on cherche à différencier un sujet sain et un sujet ayant subi une lésion au cerveau, par exemple. Ainsi, comme l'étude en cours s'intéresse à l'incertitude, il a été convenu, entre autres critères de sélection, de ne retenir que des participants ne présentant pas de trouble anxieux soupçonné tel que décrit par le DSM-IV-R (Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux, 2000). Comme l'expliquent Krain, Hefton, Pine, Ernst, Castellanos et Milham (2008), il existe effectivement un lien entre l'intolérance à l'incertitude et la réponse cérébrale à des situations incertaines chez les adolescents atteints d'un trouble anxieux. D'ailleurs, les modèles cognitifs du développement de certaines pathologies (par exemple le trouble d'anxiété généralisé, ou TAG) mettent en évidence le rôle important de l'intolérance à l'incertitude qui s'observe notamment par l'affaiblissement des capacités de prise de décision (notre traduction libre de l'ex-

pression « *impairments in decision-making* ») (Krain *et al.*, 2006). Cet affaiblissement serait attribuable à la façon dont le cortex frontal se développe, particulièrement lors du processus de maturation qui se produit à l'adolescence, lequel contribue notamment au développement de compétences cognitives comme la prise de décision (*ibidem*). Les recherches de Krain *et al.* (2006, 2008) justifient ainsi l'utilisation d'un test diagnostique pour ne sélectionner que les participants sains, c'est-à-dire sans trouble anxieux soupçonné. L'outil utilisé fut l'ADIS-IV condensé (Boivin et Marchand, 1996) (voir *Appendice A*), lequel est constitué de sept sections et permet de cibler des comportements relatifs aux huit troubles anxieux suivants : trouble panique, agoraphobie, phobie sociale, trouble d'anxiété généralisé, trouble obsessionnel-compulsif, phobie spécifique, trouble de stress post-traumatique / trouble de stress aigu, ainsi que trouble dépressif majeur. Pour la recherche, seulement deux participants ayant manifesté une phobie spécifique simple (phobie des araignées) ont quand même été retenus en raison du contexte précis de l'anxiété, alors que tous les autres participants retenus n'ont démontré aucun signe de trouble anxieux soupçonné. À noter qu'en cours d'entrevue, trois jeunes femmes et six jeunes hommes ont dû être exclus en raison d'un trouble anxieux soupçonné selon les critères diagnostiques du DSM-IV-R. Au final, neuf participants furent refusés sur un total de 33 entrevues téléphoniques, soit 27 %.

Quatrième critère : la latéralité du cerveau

Dans la même optique d'obtenir un échantillon le plus homogène possible, seuls les participants droitiers ont été retenus. À cet égard, plusieurs recherches démontrent qu'en effet, l'un des facteurs de variabilité entre sujets sur le plan de l'asymétrie de certaines activations cérébrales peut être induit par la dominance manuelle motrice. Good, Johnsrube, Ashburner, Henson, Friston et Frackomlak (2001) ont pour leur part démontré une asymétrie dans la distribution de la matière blanche (responsable de la maturité) et de la matière grise dans les lobes frontaux, temporaux et occipitaux

entre les sujets de différentes dominances manuelles motrices, incluant dans la formation hippocampale parfois sollicitée dans des tâches requérant la mémoire. En ne sélectionnant que les participants droitiers, ces différences se voyaient atténuées.

3.1.2 Protocole de recrutement

Pour la phase expérimentale, le recrutement a eu lieu dans trois établissements d'enseignement collégial de Montréal. Des courriels ont été envoyés aux coordonnateurs des différents programmes non scientifiques pour solliciter quinze minutes au début d'un cours chez leurs enseignants, le temps de présenter la recherche aux étudiants et recruter des volontaires, et ce, à l'aide d'un coupon de participation sur lequel étaient mentionnés les trois premiers critères de base pour être éligible : être novice, être droitier et être majeur (pour plus de précisions, voir l'*Appendice B*).

Au total, 99 jeunes se sont portés volontaires. Les plus jeunes volontaires entre 18 et 20 ans ont ensuite été sollicités par courriel quant à leur disponibilité pour une entrevue téléphonique durant laquelle l'ADIS-IV (test d'anxiété, voir *Appendice A*) et le dépistage (questionnaire obligatoire, fourni par l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal, de l'*Unité de neuroimagerie fonctionnelle*, ou UNF, concernant la sécurité et la santé, voir *Appendice C*) permettaient de finaliser l'acceptation du participant. Lorsqu'un participant se qualifiait, une réservation à même le site Web de l'UNF était alors placée. Enfin, un formulaire de consentement (voir *Appendice F*) lui était aussitôt envoyé par courriel afin qu'il puisse en faire la lecture et prendre une décision libre et éclairée quant à son implication. Ainsi, 12 jeunes femmes et 12 jeunes hommes ont été sélectionnés (voir *Appendice D* pour un portrait exhaustif de l'échantillon). À noter qu'après expérimentation, seulement 11 garçons se sont présentés, pour un total de 23 participants.

Tableau 3.1 – Distribution
de l'âge des participants

Genres	Âges
Femmes	6 femmes de 18 ans, 4 femmes de 19 ans, 2 femmes de 20 ans (pour un total de 12)
Hommes	7 hommes de 18 ans, 3 hommes de 19 ans, 1 homme de 20 ans (pour un total de 11)

Tableau 3.2 – Comparaisons statistiques de l'échantillon

Femmes	Hommes
Nombre : 12	Nombre : 11
Moyenne d'âge : 18,7 ans (environ 18 ans et 8 mois)	Moyenne d'âge : 18,4 ans (environ 18 ans, 4 mois et 10 jours)
Écart-type : 0,78 (environ 9 mois et 11 jours)	Écart-type : 0,67 (environ 8 mois et 3 jours)
Établissements : 10 femmes d'établissements publics 2 femmes d'un établissement privé	Établissements : 2 hommes d'établissements publics 9 hommes d'un établissement privé

3.2 Instrumentation

Cette section regroupe à la fois des informations concernant l'instrumentation nécessaire à l'imagerie, ainsi que celles par rapport à la tâche cognitive à laquelle ont été soumis les 23 participants. Ces deux outils de cueillette de données constituent l'ensemble des instruments utilisés dans cette recherche.

3.2.1 Choix de la technique d'imagerie cérébrale

En 2011, plusieurs techniques existaient afin de recueillir des données sur l'activité du cerveau. Sur le plan économique, l'électro-encéphalographie représentait une

option intéressante ; de plus, cette technique permet d'obtenir des données à la milliseconde près et de détecter des activations profondes. Par contre, l'électro-encéphalographie présente un inconvénient important. En effet, comme le signal est dévié par le crâne et les méninges, cette technique ne permettait pas d'obtenir une bonne résolution spatiale, laissant en plan les possibilités d'interpréter avec précision la provenance de l'activité cérébrale. La magnétoencéphalographie (MEG), pour sa part, ne présente pas cet inconvénient. Avec cette deuxième technique d'imagerie, les champs magnétiques issus de l'électricité (émise par l'activité du cerveau) sont captés à la milliseconde près, avec une résolution spatiale de 2 à 3 mm. En revanche, l'activité de certaines régions est difficile à obtenir, entre autres les gyri et les structures plus profondes. Mais comme l'intérêt de l'étude actuelle implique ces régions, la MEG ne pouvait être une option valable. La tomographie par émission de positron n'était pas non plus une option intéressante pour ce type de recherche, parce qu'en plus d'offrir une résolution temporelle de 30 secondes et une résolution spatiale de 10 mm, cette technique implique un protocole plus invasif étant donné l'injection d'un marqueur radioactif dans le système circulatoire des participants et ce, afin de permettre à l'appareil de détecter les fluctuations du débit sanguin au cerveau, révélant une activité à différents endroits.

Somme toute, l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) s'avérait être la technique la plus appropriée pour les besoins de cette étude, du fait qu'elle offre une résolution temporelle entre 1 et 4 secondes, une résolution spatiale d'environ 1 mm, la flexibilité dans la configuration du design et la disponibilité. Cette technique non invasive s'est aussi avérée être un choix intéressant, et ce, malgré une limite d'imagerie autour des sinus, donc des structures orbito-frontales du cerveau, une région qui de prime abord n'attire pas particulièrement l'attention de cette recherche et qui ne cause donc pas d'inconvénients majeurs, étant donné que toutes les autres régions du cerveau sont observables, y compris les structures profondes.

Ainsi, l'appareil d'IRMf utilisé dans le cadre de cette recherche est le Siemens MAGNETOM TRIO TIM de 3 teslas comprenant une antenne de 32 canaux. Cet appareil est situé à l'*Unité de neuroimagerie fonctionnelle* (UNF) de l'Institut gériatrique de Montréal.

3.2.2 Les conditions expérimentales

Comme l'intérêt de la recherche porte sur l'identification des mécanismes cérébraux impliqués dans l'incertitude chez l'apprenant novice, et sachant que l'imagerie par résonance magnétique serait la technique de choix, il fallait arriver à créer une tâche cognitive appropriée pour la technique d'IRMf qui permettait aux participants d'exprimer une incertitude quant à leurs réponses et arriver à vérifier les hypothèses. C'est ainsi que des conditions expérimentales émergèrent afin de guider la création de stimuli et la conception d'une tâche cognitive.

D'abord, il fallu créer des stimuli qui allait tantôt susciter la certitude, tantôt l'incertitude afin d'arriver à obtenir les contrastes nécessaires à l'hypothèse première. Ces deux catégories de stimulations ont ensuite été divisées en deux autres catégories, soient des stimuli scientifiquement correctes ou incorrectes. Cette 2e subdivision permet de couvrir un ensemble de situations réalistes en contextes scolaires et vérifier l'ensemble des sept conceptions alternatives erronées fréquemment retrouvées dans l'écologie conceptuelle des novices. Ceci permet aussi d'optimiser les chances d'obtenir des activations d'attribution interne (incertitude conceptuelle) liées à un contexte scolaire réaliste puisque les stimulations se référaient à ces conceptions fréquemment rencontrées en contexte de classe, donc de pertinemment vérifier la deuxième hypothèse. Enfin, une dernière subdivision permet de compléter la création des conditions expérimentales de part le simple fait que les réponses des participants

ne pourraient qu'être bonnes ou mauvaises. En tout, donc, huit conditions expérimentales sont nées.

Ainsi, seront présentés des circuits électriques scientifiquement corrects ou incorrects pour lesquels les participants novices seraient certains ou incertains, et qu'il leur serait alors demandé de répondre selon deux critères précis : en premier lieu, selon qu'il croit le circuit correct ou incorrect scientifiquement, ensuite, selon qu'il soit certain ou incertain de sa réponse. Ce processus engendre dans l'esprit du participant ainsi 4 réponses possibles:

- (1) Le circuit est **correct**, et j'en suis **certain**.
- (2) Le circuit est **incorrect**, et j'en suis **certain**.
- (3) Le circuit est **correct**, mais j'en suis **incertain**.
- (4) Le circuit est **incorrect**, mais j'en suis **incertain**.

Par la suite, les réponses du participant sont comparées aux réponses scientifiques afin de déterminer si elles sont bonnes ou mauvaises par rapport à la réponse scientifique. Cette dernière étape sert à déterminer un niveau de légitimité quant à la certitude ou l'incertitude exprimée, par exemple si un participant dit qu'il est certain et que sa réponse est bonne, on considère sa certitude comme légitime, même chose s'il exprime une incertitude et qu'il émet effectivement une mauvaise réponse. Toutefois si un participant exprime une certitude et une mauvaise réponse, cette certitude sera considérée comme illégitime, même chose s'il se dit incertain et qu'il émet une bonne réponse. Ces quatre réponses, couplées à légitimité des réponses, forment ainsi les huit conditions expérimentales (voir *Appendice E* pour un tableau synthèse des huit conditions).

- **Condition 1** – Le participant donne une **bonne réponse**, le circuit est **correct** et il est **certain** de sa réponse. Cette condition est considérée comme étant la manifestation d'une certitude légitime lorsque le circuit est correct (*CLC*). Selon Hasan (1999), le participant montre qu'il utilise une connaissance scientifique.
- **Condition 2** – Le participant donne une **bonne réponse**, le circuit est **incorrect** et il est **certain** de sa réponse. Cette condition est considérée comme étant la manifestation d'une certitude légitime alors que le circuit est incorrect (*CLI*). Selon Hasan (1999), dans cette condition, le participant montre encore qu'il utilise une connaissance scientifique.
- **Condition 3** – Le participant donne une **bonne réponse**, le circuit est **correct**, et il est **incertain** de sa réponse. Cette condition est considérée comme étant la manifestation d'une sous-estimation alors que le circuit est correct. Selon Hasan (1999), le participant montre ici qu'il manque de connaissance (qu'elle soit scientifique ou naïve), d'où une incertitude, certes, mais qui apparaît illégitime puisqu'il donne une bonne réponse (*IIC*).
- **Condition 4** – Le participant donne une **bonne réponse**, le circuit est **incorrect**, et il est **incertain** de sa réponse. Cette condition est considérée comme étant la manifestation d'une sous-estimation alors que le circuit est incorrect. Selon Hasan (1999), le participant montre qu'il manque de connaissance scientifique ou naïve, d'où une incertitude, certes, mais qui apparaît illégitime puisqu'il donne une bonne réponse (*III*).
- **Condition 5** – Le participant donne une **mauvaise réponse**, le circuit est **correct**, et il est **certain** de sa réponse. Cette condition est considérée comme étant la manifestation d'une surestimation alors que le circuit est correct. Selon Hasan (1999), le participant manifeste ici qu'il utilise une connaissance naïve erronée pour répondre à la question, connaissance qu'il

semble certain à son sujet, d'où une certitude illégitime puisqu'il donne une mauvaise réponse (*CIC*).

- **Condition 6** – Le participant donne une **mauvaise réponse**, le circuit est **incorrect**, et il est **certain** de sa réponse. Cette condition est considérée comme étant la manifestation d'une surestimation alors que le circuit est incorrect. Selon Hasan (1999), le participant montre qu'il utilise aussi une conception naïve erronée dont il est certain, d'où une certitude illégitime puisqu'il donne une mauvaise réponse (*CII*).
- **Condition 7** – Le participant donne une **mauvaise réponse**, le circuit est **correct**, et il est **incertain** de sa réponse. Cette condition est considérée comme étant la manifestation d'une incertitude légitime alors que le circuit est correct (*ILC*). Selon Hasan (1999), le participant montre qu'il manque de connaissance scientifique ou erronée sur laquelle s'appuyer pour être certain de sa réponse, d'où une incertitude légitime puisque cette réponse est mauvaise.
- **Condition 8** – Le participant donne une **mauvaise réponse**, le circuit est **incorrect**, et il est **incertain** de sa réponse. Cette condition est considérée comme étant la manifestation d'une incertitude légitime alors que le circuit est incorrect. Selon Hasan (1999), le participant montre encore qu'il manque de connaissance, qu'elle soit naïve ou scientifique, pour être certain de sa réponse. Cette incertitude est ainsi considérée comme légitime puisque la réponse est effectivement mauvaise.

Tableau 3.3 – Sommaire des huit conditions expérimentales : vocabulaire et acronymes

Comportement du participant ↴	Certitude	Incertitude
Bonne réponse	Certitude légitime (CL) Condition 1 : stimulation scientifiquement correcte (CL/Correcte) Condition 2 : stimulation scientifiquement incorrecte (CL/Incorrecte)	Incertitude illégitime (II) Condition 3 : stimulation scientifiquement correcte (II/Correcte) Condition 4 : stimulation scientifiquement incorrecte (II/Incorrecte)
Mauvaise réponse	Certitude illégitime (CI) Condition 5 : stimulation scientifiquement correcte (CI/Correcte) Condition 6 : stimulation scientifiquement incorrecte (CI/Incorrecte)	Incertitude légitime (IL) Condition 7 : stimulation scientifiquement correcte (IL/Correcte) Condition 8 : stimulation scientifiquement incorrecte (IL/Incorrecte)

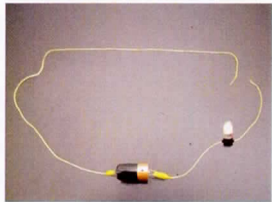
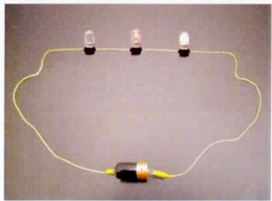
Ces huit conditions expérimentales permettront ainsi de détecter les activations cérébrales liées tantôt à la certitude, tantôt à l'incertitude, ce qui facilitera la comparaison et contribuera à distinguer l'incertitude de la certitude.

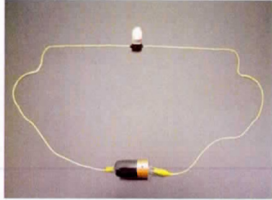
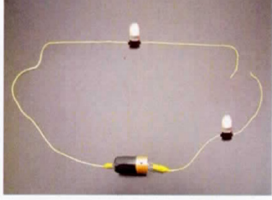
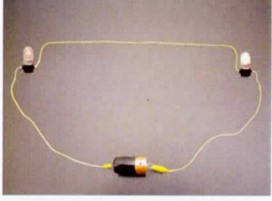
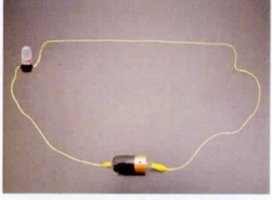
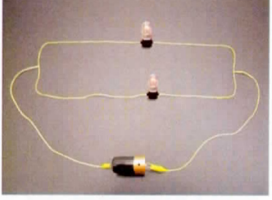
3.2.3 Conception des stimuli

Comme il est difficile de prédire le niveau de certitude d'un participant quant à ses réponses, un vaste ensemble de stimuli fut d'abord créé et testé lors d'une pré-expérimentation par des participants comparables à ceux sélectionnés pour l'étude. L'ensemble des données recueillies à cette étape permet de dégager une tendance pour chaque stimulus, ce qui facilita la sélection des stimuli pour la tâche finale qui devait être conçue de façon à ce que les participants puissent donner des réponses aux huit conditions expérimentales. Seulement dans ces conditions, une série pourra être considérée comme « complète » par les logiciels de traitement de données. Cette délicate étape s'avère essentielle afin de sécuriser la prise de mesures.

Les stimulations ont été conçues à partir des études de Shipstone (1984) et Potvin *et al.* (2010) portant sur les conceptions naïves chez le novice, en physique électrique. Ainsi, 600 circuits électriques furent créés à l'aide de photos d'ampoules éteintes, légèrement allumées ou pleinement allumées, d'une pile et de fils jaunes formant un circuit tantôt en série, tantôt en parallèle. Ces photos ont été prises sur un fond gris qui contraste avec l'équipement photographié, matériel habituellement retrouvé dans la plupart des écoles secondaires. Les stimuli ont été montés à l'aide du logiciel *PhotoShop Élément 8* (PSE8) et contiennent l'un et/ou l'autre des éléments suivants: le nombre d'ampoules sur le circuit (1, 2 ou 3), le jeu des intensités (3 intensités possibles), le type de circuit (en série ou en parallèle), un ou des coupures dans le fil électrique, ainsi que la distance des ampoules sur les deux types de circuit, selon qu'elles soient plus près ou plus loin des pôles positif et négatif de la pile ou d'une coupure dans le fil.

Tableau 3.4 – Correspondance des conceptions naïves et exemples de stimuli

Conceptions naïves	Exemples de circuits associés à la conception naïve
1. Un seul fil suffit pour allumer une ampoule. Le participant novice croit que ce circuit est correct puisque selon lui, un seul fil est suffisant pour alimenter l'ampoule.	 <p>Circuit incorrect</p>
2. Un pôle de la pile est une source de courant électrique alors que l'autre pôle reçoit l'excès de courant ou le courant utilisé. Le participant novice croit que ce circuit est correct puisqu'il n'y a plus d'électricité après le passage du courant dans les deux premières ampoules.	 <p>Circuit incorrect</p>

Conceptions naïves	Exemples de circuits associés à la conception naïve
<p>3. Deux courants différents se rencontrent et s'entrechoquent dans l'ampoule. Bien que ce circuit soit scientifiquement correct, le participant novice croit, à tort, que les courants se sont entrechoqués dans l'ampoule pour la faire allumer. Il est impossible de savoir si le participant émet une réponse sur une base scientifique ou naïve, mais la présence de circuits de ce type permet d'assurer des réponses certaines à tout coup ; ici, c'est plutôt la signature cérébrale qui nous intéresse plutôt que la base conceptuelle.</p>	 <p>Circuit correct</p>
<p>4. Il n'est pas nécessaire que le courant retourne à la source pour allumer une ampoule. Le participant novice croit que le circuit est correct, car le courant n'a pas besoin de circuler dans toute la boucle pour allumer l'ampoule.</p>	 <p>Circuit incorrect</p>
<p>5. Une ampoule consomme le courant. Une deuxième ampoule reliée en série à une première allumera ainsi moins que la première. Le participant novice croit que le circuit est correct, car la première ampoule a consommé le courant et qu'il en reste moins pour la seconde.</p>	 <p>Circuit incorrect</p>
<p>6. Un nœud ou un long fil sont des obstacles substantiels à la circulation du courant. Le participant croit que le circuit est correct, car l'ampoule est trop loin du point de départ de la pile, selon que le courant est dans le sens antihoraire.</p>	 <p>Circuit incorrect</p>
<p>7. Le courant se divise également dans les circuits connectés en parallèle. Le participant novice croit que le circuit est correct, car le courant nécessaire pour allumer fortement une ampoule s'est séparé en deux, allumant les ampoules moyennement.</p>	 <p>Circuit incorrect</p>

3.2.4 – La tâche cognitive : design

On appelle « tâche cognitive » l'activité à laquelle sont soumis les participants alors qu'ils sont dans l'appareil d'imagerie. Cette tâche doit être conçue minutieusement afin de contrôler les variables et obtenir des données fidèles et valides. Pour la recherche en cours, un design soustractif événementiel s'est avéré approprié.

La raison qui justifie l'utilisation d'un design événementiel plutôt qu'en bloc s'appuie sur les travaux de Posner *et al.* (1997) indiquant que le cerveau cherche rapidement à automatiser le traitement de l'information pour être plus efficace et libérer la mémoire de travail à d'autres éventualités. Ainsi, le design en bloc aurait pu faire tendre le participant à répondre sans trop réfléchir, alors qu'il réalise que les questions d'un bloc sont similaires ou suscitent les mêmes conceptions, donc sensiblement la même réponse. Ainsi, il n'était pas souhaitable d'élaborer un bloc de questions pour lequel tous les participants émettraient une réponse identique, et même si cela avait été possible, il y avait danger que les participants s'habituent à répondre toujours la même réponse, occasionnant ainsi une perte de vigilance cognitive, ce qui n'est pas souhaitable lorsqu'on étudie le raisonnement. Il convenait mieux de concevoir une tâche au design événementiel, méthode où l'ordre des questions est alors déterminé au hasard, où toutes les conditions s'y retrouvent et où le participant doit demeurer vigilant.

3.2.5 Pré-expérimentation et tâche finale

Ces décisions permirent donc de créer cinq versions de tâches cognitives préliminaires qui ont été testées afin de déterminer la puissance relative de chaque stimulus quant aux réponses qu'elles génèrent. Pour la phase pré-expérimentale, 17 déplacements du laboratoire mobile (un ensemble de 37 ordinateurs portables transportés dans les classes à l'aide de caissons) dans deux établissements collégiaux

montréalais se sont effectués et ce, auprès de 21 groupes d'étudiants, ce qui permit de recueillir les réponses de 210 novices, et d'en déduire les réponses les plus probables pour chaque stimulus, et donc leur appartenance la plus probable à une condition spécifique. Ces données recueillies lors de la pré-expérimentation ont permis de concevoir une tâche comportant 4 séquences de 78 circuits électriques, dont quelques exemples sont présentés à la figure 3.1. À cette étape, il a été constaté que certaines conditions se présentaient plus rarement que d'autres. Il a donc été convenu de répéter l'apparition de certaines stimulations pour susciter une réponse associée à ces conditions et ce, d'une séquence à l'autre, afin d'augmenter les chances d'obtenir des séquences complètes, c'est-à-dire des réponses pour toutes les conditions. La tâche a été ainsi créée de telle sorte que chaque stimulation soit présentée durant un maximum de 12 secondes, sachant que la moyenne du temps d'exécution par question était de 5,6 secondes lors de la pré-expérimentation, afin de permettre un temps de réaction plus lent lié aux questions plus complexes à analyser : avec plus d'ampoules et/ou plus de fils. Sur les 60 minutes allouées pour la cueillette des données à l'UNF, la tâche prenait donc environ 40 minutes à être exécutée. Encore, la figure 3.1 (Potvin et al. 2014) montre deux exemples partiels de séries (la série 1 et la série 4) avec chacun la 1^{re} stimulation et la dernière stimulation.

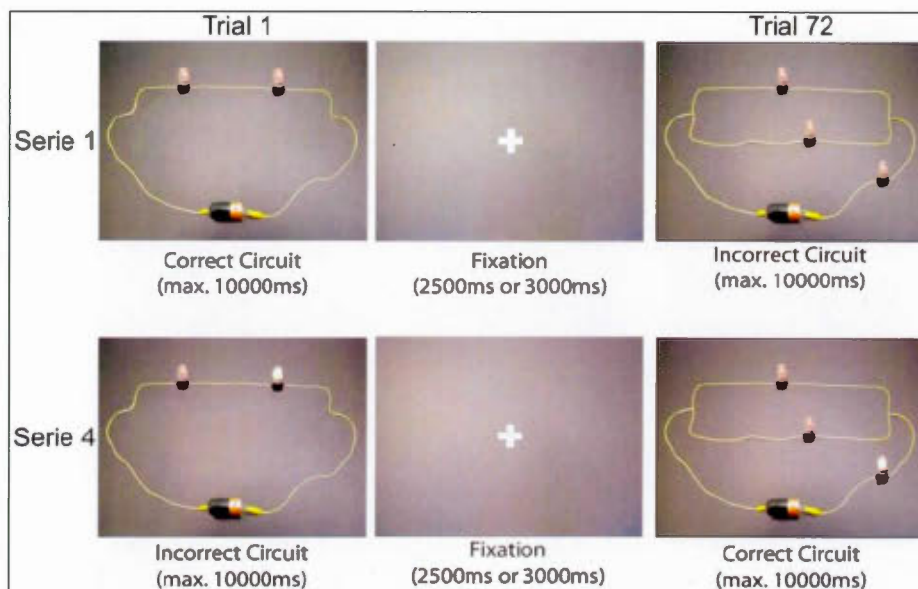


Figure 3.1 – Extrait de la tâche composée de 222 images de circuits électriques (Potvin, Turmel et Masson, 2014)

3.3 Déroulement

La phase expérimentale a eu lieu à l'UNF de Montréal. Les participants se présentaient à l'heure convenue et selon certaines conditions exigées par l'UNF, par exemple avoir les cheveux secs, être sans maquillage et/ou sans bijou(x). De telles précautions étaient nécessaires pour assurer leur sécurité, mais aussi pour s'assurer d'obtenir des images de cerveau exemptes de distorsion.

3.3.1 Consignes et protocole à l'UNF

Afin d'économiser du temps d'apprentissage des consignes dans l'appareil d'imagerie et possiblement fausser les premières données acquises, les participants ont été familiarisés avec les consignes et le protocole d'acquisition de données dans une salle de simulation, et ce, quelques minutes avant le *scan* proprement dit. En

effet, pour éviter que des biais induits par l'expérimentateur et aussi par souci d'uniformité, les participants étaient invités à lire les consignes sur un écran d'ordinateur, puis à répondre à 20 questions dites « de pratique » à l'aide du clavier. Ces dernières étaient issues du même groupe de stimulations créées pour la pré-expérimentation, mais aucune d'entre elles ne se retrouvait dans la tâche cognitive expérimentale. Le participant apprenait alors à respecter les délais de réponses et à utiliser les bons doigts pour signifier sa réponse. Par la suite, le participant était invité à refaire la même pratique, mais cette fois, dans un appareil factice afin de mettre en application sa compréhension des consignes dans un contexte similaire à la phase expérimentale : à l'étroit, sans bouger, et en utilisant les boîtes de réponse.

Ces boîtes de réponses sont en fait des manettes attachées aux poignets et aux mains des participants, sur lesquelles les doigts de chaque main étaient posés sur des boutons associés aux quatre réponses possible, c'est-à-dire « index » pour « certain » et « majeur » pour « incertain ». Enfin, la main gauche était associée à la réponse « le circuit est incorrect », alors que la main droite était associée à la réponse « le circuit est correct », pour ainsi constituer les quatre réponses possibles.

3.3.2 Contraintes lors de l'acquisition de données

Quoique l'imagerie par résonance magnétique soit une technique qui soit maintenant largement plus populaire que l'utilisation du *PET scan* (ou en français, le TEP pour tomographie par émission de positron) depuis les dix dernières années (Ward, 2010) et que les avantages clés de l'IRMf soient les résolutions temporelle et spatiale, l'inconvénient principal de l'appareil est dû au fait qu'il produit un bruit important lorsqu'en fonction, le rendant moins intéressant pour étudier le système auditif ou pour soumettre les participants à des stimuli audio. Même si dans l'actuelle étude il n'y a aucun stimulus auditif, le participant est invité à porter des bouchons pour son confort.

Un autre inconvénient provient de la nécessité absolue pour le participant de ne pas bouger dans l'appareil et ce, du début à la fin de tout le processus d'acquisition des données. Cette contrainte est telle qu'un déplacement supérieur à 2 ou 3 mm peut nuire au pré-traitement et à l'analyse des données. C'est pourquoi on tente plutôt de faire répondre les participants à l'aide de boîtes de réponses attachées aux mains, pour que ces derniers puissent appuyer sur la touche qui convient à leur réponse sans déplacer la tête. Ainsi, la tâche se devait d'être constituée d'images projetées sur un miroir, lequel se trouvant à quelques centimètres des yeux de chaque participant allongé dans l'appareil. Encore une fois, la période de simulation permettait au participant de bien se familiariser à cette contrainte.

D'autres contraintes dues à l'utilisation de l'IRMf sont aussi associées à la réponse hémodynamique du cerveau. En effet, l'appareil d'imagerie par résonance magnétique utilisé pour cette recherche est muni d'une antenne de 32 canaux qui capte les perturbations de champs magnétiques provoquées par l'hémoglobine désoxygénée ; lorsque les neurones consomment l'oxygène, une distorsion dans le champ magnétique local de l'appareil apparaît, laquelle donne une indication de la concentration d'hémoglobine désoxygénée dans le sang entourant une région active (Ward, 2010). On appelle ce contraste BOLD (« *blood oxygen-level-dependant* ») et la variation de ce signal dans le temps en réponse à une augmentation de l'activité neuronale est communément appelée « réponse hémodynamique » (*ibidem*). Dans le cas de l'IRMf, le signal BOLD augmente avec un délai d'environ deux secondes et atteint un plateau au bout de 7 à 10 secondes après l'augmentation d'activité neuronale. Ce qui intéresse normalement les études en neuroimagerie concerne plutôt la phase où il y a consommation de l'oxygène et où le signal BOLD est alors à son maximum, c'est-à-dire entre 2 et 8 secondes.

C'est pourquoi il importait que la présentation des stimuli et des pauses soit judicieusement planifiées afin d'optimiser la réponse hémodynamique et ainsi capter des informations à différents moments. Dans le présent cas, suite à l'analyse des temps de réponse obtenus lors de la pré-expérimentation, dont la moyenne était 5.6 secondes avec un minimum de 2.9 et un maximum de 10.2 secondes, il a été convenu de présenter les questions durant un maximum de 12 secondes afin de permettre aux participants d'avoir suffisamment de temps pour analyser le stimulus et émettre une réponse qui tienne également compte de leur niveau de certitude. Chaque stimulus a été ensuite suivi de l'image d'une croix durant 2,5 à 3,5 secondes pour permettre à la réponse hémodynamique de s'estomper avant la présentation d'un nouveau stimulus. Cette variation du temps de pause tente de prévenir la perte de vigilance chez le participant et d'obtenir des images à différents moments du traitement cognitif, sachant que l'appareil prend systématiquement des images du cerveau toutes les 2 secondes.

3.3.3 Acquisition des images

Dans la salle d'imagerie, le participant est invité à s'allonger sur la table de l'appareil. Des bouchons et des écouteurs lui sont remis afin d'atténuer le bruit émis par l'appareil ainsi que pour communiquer avec lui. Par la suite, on s'affaire à immobiliser le corps et la tête du sujet à l'aide de coussins de mousse et on pose l'antenne sur sa tête, tout en ajustant le miroir vis-à-vis ses yeux, et on installe les boîtes de réponses à ses mains. Le participant est alors prêt pour commencer la séance d'IRMf. Cette séance se déroule en plusieurs étapes :

- (1) On teste les boutons de réponse avec le participant en lui demandant d'appuyer sur chacun d'eux sur rappel de chaque réponse possible et ainsi réviser les consignes.

- (2) On effectue une localisation du cerveau, ou *localizer*. Le logiciel de l'UNF permet alors d'ajuster différents paramètres d'acquisition afin d'obtenir les images de régions ciblées en fonction de la position et de la forme du cerveau du sujet. À cette étape, on détermine avec le technicien le meilleur point de vue pour l'acquisition, en fonction de l'anatomie unique du cerveau du participant.
- (3) On présente ensuite les 4 séries. Entre chacune d'elle, on arrête la prise d'images, on sauvegarde les données de la série, on en profite pour donner un feedback au participant quant au fait qu'il n'a pas bougé, que ses réponses sont reçues correctement, et on s'assure de son confort.
- (4) Lorsque les 4 séries de questions sont terminées, on demande au participant de fermer les yeux pour une dizaine de minutes. On éteint alors l'écran pour pouvoir opérer sur les données dans la salle de contrôle sans déranger le participant avec des mouvements à l'écran, puis on effectue le *scan* anatomique qui servira pour comparer les activations lors de la tâche aux zones précises.
- (5) Enfin, à la fin de l'expérience, on aide le participant à sortir de l'appareil, on lui laisse le temps de se rhabiller, puis on lui demande du feedback qui pourrait aider à comprendre ses résultats avant de lui remettre sa rémunération.

Lors de l'acquisition des données, certains paramètres doivent être prédéterminés avec le technicien. Entre autres, on peut déterminer la taille des voxels, l'épaisseur des tranches, l'espacement entre les tranches et l'orientation des tranches. Pour la recherche actuelle, les paramètres d'acquisition ont été sélectionnés sur la base d'autres études de ce genre et citées dans ce mémoire, par exemple une taille traditionnelle de voxels de 3 mm x 3 mm x 3 mm, ce qui apparaît être une taille suffisante pour détecter des activations significatives. Le tableau suivant regroupe l'ensemble des paramètres d'acquisition selon deux catégories, soit les paramètres

d'images fonctionnelles pour les activations cérébrales, et les paramètres d'images structurales pour l'association activation-région et la comparaison intersujets. Lorsque la séance est terminée, on aide le participant à s'extirper de l'appareil et on l'invite à se rhabiller. On recueille ses commentaires, puis une compensation lui est remise, ainsi qu'une photo de son cerveau par courriel dans les jours suivants.

Tableau 3.5 – Paramètres liés à l'acquisition des images

Paramètres d'acquisition des images fonctionnelles (T2*)	Appareil : Siemens MAGNETOM TRIO TIM 3,0 T TR = 2000 ms ; TE = 30 ms « <i>Flip angle</i> » : 90 degrés Taille des voxels : 3 mm x 3 mm x 3 mm Ordre d'acquisition : <i>interleaved</i> Orientation des tranches : « AC-PC line » (« <i>anterior commissure – posterior commissure</i> ») Nombre de tranches : 33 FOV : 192 Résolution dans le plan (matrice) : 64 x 64 Volume : 360 Antenne de tête : 32 canaux Épaisseur des tranches : 3,0 mm Espace entre les tranches : 25 % (0,8 mm)
Paramètres d'acquisition des images structurales (T1)	Appareil : Siemens TIM 3,0 T TR = 2300 ms ; TI = 900 ms (« <i>inversion time</i> ») ; TE = 2.98 ms « <i>Flip angle</i> » : 9 degrés Taille des voxels : 1,0 x 1,0 x 1,0 mm Ordre d'acquisition : « <i>interleaved</i> » Orientation des tranches : sagittal Nombre de tranches : 176 FOV : 256 Résolution dans le plan (matrice) : 240 x 256 Antenne de tête : 32 canaux

3.4 Analyse des données

L'analyse de données nécessite trois étapes de prétraitement (correction du mouvement, normalisation, lissage) et une étape de traitement (comparaison statistique). Ces étapes sont réalisées à l'aide du logiciel *SPM 8* développé par le Wellcome Trust Centre for Neuroimaging fonctionnant avec *MATLAB 7.4*. La figure suivante présente les différentes étapes dans l'ordre nécessaire.

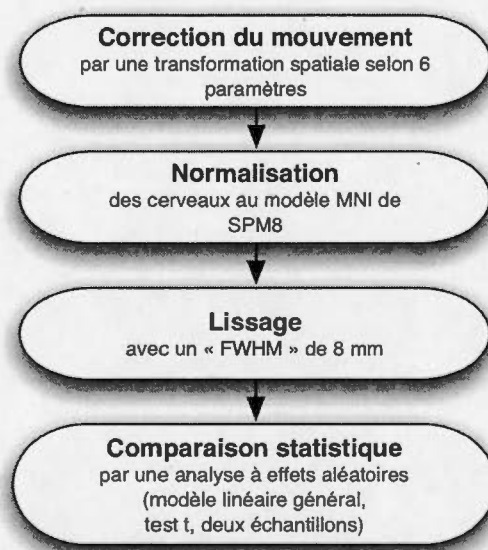


Figure 3.2 – Aperçu de l'analyse des données réalisée à l'aide de SPM 8 (Masson, S. 2012)

3.4.1 La correction du mouvement

Le but de corriger les mouvements de la tête est de s'assurer qu'une région est positionnée au même endroit durant toute la durée d'acquisition des images, ce qui s'avère essentiel dans l'analyse des données. Pour ce faire, il faut considérer le cerveau comme étant un objet rigide et appliquer des transformations spatiales selon six paramètres (trois paramètres sont liés aux translations en x, y et z, et trois sont liés aux

trois angles possibles de rotation de la tête), et ainsi aligner toutes les images recueillies au cours d'une série par rapport à une image de référence, par exemple la troisième image. Cela permet de comparer les images corrigées les unes aux autres. Cette méthode provient de l'algorithme développé par Friston, Williams, Howard, Frackowiak et Turner (1996). À noter que si les mouvements de la tête d'un sujet dépassent les 2 mm, la correction du mouvement pourrait alors être difficile à effectuer et les images pourraient être rejetées.

3.4.2 Normalisation

La normalisation est une étape importante qui consiste à modifier les images de chacun des sujets pour qu'elles soient comparables, c'est-à-dire qu'elles soient identiques en longueur et en largeur, par exemple. En effet, cette technique permet de minimiser les différences anatomiques individuelles. Ainsi, par la procédure de segmentation développée par Ashburner et Friston (2005) et via le même logiciel *SPM 8*, les images cérébrales sont appliquées à un modèle de cerveau standard.

3.4.3 Lissage

Cette dernière étape préparatoire à l'analyse des données permet d'améliorer le rapport signal sur bruit (traduction libre de « *signal-to-noise* »). Ce procédé consiste à répartir aux voxels environnants le signal capté pour un voxel activé. Cette façon de faire semble provoquer une perte d'informations, mais en fait, les voxels voisins se renforcent mutuellement et la région concernée se montre alors plus activée qu'au départ. Cette étape améliore ainsi la portée spatiale d'une région active et donne de meilleures chances de trouver les régions qui sont communes entre les participants. Dans cette étude, un lissage de 6 mm permettait parfois un meilleur ratio signal sur bruit, alors que d'autres contrastes bénéficiaient davantage d'un lissage de 10 mm.

Un lissage de 8 mm a donc été retenu comme la plupart des recherches de ce domaine citées dans cette étude.

3.4.4 Modèle linéaire général

Le cerveau étant constamment en activité, le but de l'analyse des données est d'évaluer si une région est significativement activée en réponse à la tâche cognitive. Ainsi, après avoir corrigé, lissé et normalisé les données, l'utilisation d'un test-t permet d'analyser statistiquement les différences d'activation. Cette analyse se base sur un modèle linéaire général dans lequel on considère que les données (y) sont modélisées à partir d'une combinaison de différents facteurs ($x_{(i)}$) ayant différentes pondérations (β_i) ainsi qu'une variabilité inexplicables par le modèle (ε). L'équation suivante sera donc utilisée :

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (1)$$

Ensuite, par la méthode des moindres carrés, on obtiendra les valeurs de ces différentes pondérations qui minimisent la variabilité. Sous forme matricielle, comprenant les valeurs de tous les voxels à tous les temps, on obtient :

$$Y = X \beta + \varepsilon \quad (2)$$

Ainsi, pour déterminer si les pondérations sont significativement activées, c'est-à-dire si β est significativement plus grand que zéro, on utilise un test-t :

$$t = \text{Moyenne}(\beta) / \text{Écart-type}(\text{Moyenne}(\beta)) \quad (3)$$

Pour déterminer s'il existe une différence significative entre deux régions ou deux groupes, on utilise aussi un test-t en utilisant $\beta_a - \beta_b$ au lieu de β .

Puisque nous ne voulons pas non plus n'analyser l'activité cérébrale que d'un seul individu, mais plutôt celle d'un groupe d'individus, il faudra aussi trouver la moyenne des résultats de l'ensemble des participants dans chacune des huit conditions prévues. Pour ce faire, et à l'aide d'une analyse de premier niveau (ou intra-sujet), le logiciel *SPM 8* permettra de fusionner les images obtenues. Une analyse de second niveau sera effectuée afin de permettre d'obtenir seulement les activations considérées comme étant les plus importantes chez tous les participants pour une condition donnée, ou un regroupement donné de conditions.

3.5 Considérations éthiques

L'utilisation de l'appareil d'imagerie par résonance magnétique n'implique aucun traitement invasif. Ainsi, la présente étude ne semble pas avoir rencontré de difficulté éthique particulière. Certes, il existe la possibilité d'inconfort dans l'appareil, du fait d'être immobile durant l'acquisition des données, ou d'être incommodé par les bruits émis depuis l'appareil, mais des précautions sont appliquées pour minimiser l'impact de ces inconforts, dont l'usage de coussins, de couvertures et de bouchons d'oreille à usage unique. De plus, afin de diminuer le stress claustrophobique, la séance de pratique impliquant une simulation dans un environnement semblable au véritable appareil permet une acclimatation en douceur. Le test de dépistage d'anxiété fut aussi une façon de s'assurer qu'aucun participant ne soit affligé d'une phobie de ce genre.

Enfin, cette étude, qui a reçu les approbations éthiques de l'UQAM et de l'UNF, a été menée conformément au projet déposé. Le formulaire de consentement tel qu'il a été approuvé se retrouve à l'*Appendice F*.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

Dans ce chapitre, il sera question de présenter les résultats obtenus suite à l'analyse des données. Les résultats comportementaux seront d'abord détaillés, puis suivis des résultats d'imagerie.

4.1 Résultats comportementaux

Cette section présente d'abord différents résultats comportementaux, dont les temps de réaction et la distribution des réponses pour le contrôle des variables, ainsi qu'un portrait des comportements et commentaires recueillis pour chacune des quatre séries pour chaque participant.

Le *Tableau 4.1* présente différents comportements observés. Ces résultats s'avèrent intéressants dans la mesure où ils indiquent la pertinence de la tâche cognitive dans la collecte des données sur l'état d'incertitude recherché, autrement dit sur son efficacité à contrôler les variables. Au total, 5987 circuits électriques ont été présentés aux 22 participants retenus. Les données recueillies à 5967 stimuli ont pu être analysées et comptabilisées, ne laissant derrière que 20 stimuli n'ayant pas reçu de réponse, soit 0,3 %. Les participants ont rapporté être certains à 64,7 % de leurs réponses contre 35 % incertains. On constate d'abord un temps de réaction significativement plus élevé lors de l'émission des réponses incertaines comparativement au temps de réaction des réponses certaines [$t(5954) = -18,06, p < 0,001$]. En effet, le temps de réaction moyen pour les réponses incertaines étant de 3911 ms (SD = 1730 ms) et

3091 ms pour les réponses certaines ($SD = 1561$), cette différence de 820 ms semble indiquer que les processus cognitifs impliqués dans prise de décision en état d'incertitude prennent plus de temps à s'opérer qu'en état de certitude.

Tableau 4.1 – Portrait des résultats comportementaux

Critères	incertitude	certitude
Temps de réaction :	3911 ms	3091 ms
Écart-type :	1730 ms	1561 ms
Nombre totaux de stimuli :	2091	3865
Nombre de stimuli par type de circuit électrique		
Circuits scientifiquement corrects :	1060	1750
Circuits scientifiquement incorrects :	1031	2115
Nombre de stimuli par réponse des participants		
« Le circuit est correct » :	945	1881
« Le circuit est incorrect » :	1146	1984
Nombre de stimuli par valeur de réponse		
Bonnes réponses :	1030	2178
Mauvaises réponses :	1061	1687
Nombre de stimuli par genre		
Hommes :	891	1978
Femmes :	1200	1887
Nombre de stimuli par série		
Séries 1 et 2 :	1084	1853
Séries 3 et 4 :	1007	2012

Les résultats du tableau 4.1 montrent aussi un équilibre suffisant quant à l'impact relatif des variables parasites, soient le type de stimulus, le positionnement des stimuli dans la série et le genre des participants. En effet, comme l'émission de l'incertitude dépend de chaque individu et qu'il était difficile de créer dès le départ une tâche parfaitement équilibrée qui contrôlait chacune des variables parasites, les

résultats montre que les précautions prises dans la confection de la tâche ont effectivement mené à un équilibre et un contrôle des variables parasites.

En effet, en ce qui concernant les réponses « incertaines », 50,7 % des circuits présentés étaient scientifiquement « corrects » contre 49,3 % scientifiquement « incorrects » ; 49,3 % des réponses émises par les participants étaient « bonnes » contre 50,7 % « mauvaises » ; 42,6 % des réponses venaient d'hommes contre 57,4 % de femmes ; 45,2 % des stimuli étaient considérés « corrects » par les participants contre 54,8 % comme « incorrects » ; enfin, il y avait 51,8 % réponses incertaines dans les deux premières séquences contre 48,2 % de réponses incertaines dans les deux dernières séquences. Ces résultats laissent croire que les résultats d'imagerie observés (activations cérébrales qui seront présentées dans la prochaine sous-section) ne sont probablement pas attribuables à d'autres variables que celle mesurée, soit l'état d'incertitude.

En ce qui concerne les réponses « certaines », les comparaisons sont similaires, soient 45,3 % de circuits scientifiquement corrects contre 54,7 % incorrects ; 56,4 % de « bonnes » réponses contre 43,6 % de « mauvaises » ; 52,2 % des réponses obtenues venaient d'hommes contre 48,8 % de femmes ; 48,7 % des stimuli ont été interprétées scientifiquement « corrects » par les participants contre 51,3 % « d'incorrects » ; enfin il y avait autant de réponses « certaines » dans les deux premières séquences, soit 47,9 %, que les deux dernières, avec 52,1 %. Encore une fois, ces résultats montrent que les résultats d'imagerie ne semblent pas pouvoir être attribuables à un déséquilibre en termes de quantité de réponses correctes ou incorrectes / bonnes ou mauvaises, qualité des stimuli scientifiques ou non, du fait d'être une femme ou un homme, ou du moment de présentation, soit en début ou en fin de tâche.

Les méthodes pour arriver à traiter les données de façon significative ont aussi dues être employées avec précautions et certaines décisions influencent l'interprétation des résultats d'imagerie. En effet, les comportements des participants, à chacune des conditions et à chacune des séries, n'ont pu être spécifiquement ciblés par le logiciel de traitement de données. Une première considération réside ainsi dans les limites du logiciel à traiter les séries incomplètes. Par « séries complètes », on entend des séries pour lesquelles des réponses ont été émises dans chacune des 8 conditions expérimentales alors qu'une « série incomplète » comporte des conditions qui n'ont pas reçu de réponse. Le *Tableau 4.2* montre les comportements des participants pour chacune des séries auxquelles ils ont été soumis, et l'on constate que ce ne sont pas toutes les séries qui sont complètes. La plupart des séries sont similaires lorsqu'on les compare les unes par rapport aux autres, sauf pour la série 1. En effet, pour un peu moins que la moitié des participants, la distribution des réponses obtenues pour chaque condition expérimentale à la série 1 est significativement différente des distributions des réponses obtenues pour chaque condition aux trois autres séries. Mais dans l'ensemble, lorsque l'on compare toutes les distributions obtenues à la série 1, contre chacune des trois autres séries, la différence significative disparaît.

Pour expliquer ce résultat comportemental, comme la tâche avait été confectionnée en fonction de réponses rencontrées lors de la pré-expérimentation, il se peut que les participants aient répondu comme il était attendu, en portant une attention particulière à chacun des stimuli à la série 1, comme l'a fait le participant typique de la pré-expérimentation sur lequel s'est basée la confection de la tâche. Mais par la suite, le nombre de séries complètes diminue graduellement depuis les séries 2, 3 et 4, ce qui suggère qu'un comportement cognitif se soit produit après la première série et qu'il n'ait pas pu être observé. Au total, 11 participants sur 22 ont manifesté des processus cognitifs inattendus, lors du feedback après l'expérience (voir les commentaires dans

le tableau), et seulement 6 participants sur 22 ont donné quatre séries complètes. Une interprétation sera suggérée au chapitre suivant.

Tableau 4.2 – Portrait des séries complètes et incomplètes par participant

Participants	Série 1	Série 2	Série 3	Série 4	Commentaires des participants
01	Complète	Complète	Complète	Complète	
02	Complète	Complète	Complète	Complète	
03	Annulée	Complète	Complète	Complète	
04	Complète	X	X	X	
05	Complète	Complète	Complète	X	
06	Complète	Complète	Complète	Complète	
07	Complète	Complète	Complète	Complète	
08	Complète	X	X	X	S'endormait ; ne pensait qu'au doigt à appuyer.
09	Complète	X	X	X	Confusion à cause de la répétition des stimuli, ne savait plus ce qu'elle avait répondu aux mêmes stimuli précédemment.
10	Complète	Complète	Complète	X	
11	Complète	Complète	Complète	Complète	
12	Complète	X	Complète	X	Sent que ses conceptions se sont concrétisées au cours de la série 3 ; sent qu'elle change d'avis sur les mêmes stimuli, et à partir de là, se sent davantage certaine avec le temps.
13	Complète	X	X	X	Trouvait ça long.
14	Complète	Complète	X	Complète	Sensation de confiance en cours de route, mais à la fin, série 4, il a senti plus de doutes et a pris plus de temps.
15	Complète	X	X	Complète	Sent que ses conceptions deviennent plus scientifiques vers la fin et qu'au début, elles étaient plutôt naïves.
16	Complète	X	X	X	Après avoir compris ce qui se passait, il a simplement tenté de répondre ce qu'il avait répondu à la série 1.
17	Complète	Complète	X	X	N'a plus tenté de répondre adéquatement car trop de confusion conceptuelle. Essaie de répondre la même chose aux mêmes stimuli sans trop réfléchir.
18	Complète	X	X	X	Sent qu'elle mélangeait des concepts appris à l'école et ce que son grand-père lui avait montré.
19	Complète	Complète	Complète	X	
20	Complète	X	X	Complète	Dit avoir développé un système de réponses après la série 1, mais qu'à la série 4, il se soit remis à douter de ses réponses.
21	Complète	Complète	X	X	Dit s'être rendu compte que l'ampoule était éteinte après la série 2, et non pas juste un peu allumée. Dit que c'était impossible. A répondu un peu n'importe quoi par la suite parce qu'il ne savait plus quoi penser.
22	Complète	Complète	Complète	Complète	
TOTAL complètes	21	13	11	10	Légende : X = série incomplète

Enfin, la différence significative entre la série 1 et les autres séries porte à croire que le moment de présentation d'un stimulus ait peut-être eu un impact. Par contre, afin de mesurer l'impact du moment de présentation du stimuli et d'arriver au constat que la cette variable n'entrave pas le contrôle de la variable mesurée « incertitude », les séries ont été jumelées deux à deux pour faire la comparaison dans le temps, soit les séries 1 et 2, et les séries 3 et 4. Ainsi, il aurait été préférable de comparer individuellement la série 1 et la série 3 ou 4, par exemple. Malheureusement il fut impossible de le faire étant donné le trop petit nombre de séries complètes disponibles, ce qui aurait vraisemblablement été significatif. Encore, d'autres données ont peut-être été perdues à cette étape, quant au type d'incertitude spécifique, puisqu'au départ les participants semblent avoir bien utilisé toutes leurs conceptions alternatives (incertitude d'attribution interne) tel que prévu, et qu'ensuite les commentaires des participants suggèrent plutôt une incertitude issue de l'association stimulus-réponse (incertitude d'attribution externe), des commentaires comme « dit avoir développé un système de réponses après la série 1, mais qu'à la série 4, il se soit remis à douter de ses réponses » ou « confusion à cause de la répétition des stimuli, ne savait plus ce qu'elle avait répondu aux mêmes stimuli précédemment ». Il faudra donc tenir compte de cette possibilité lors de l'interprétation des résultats d'imagerie quant à l'hypothèse 2, soit la différence d'activation entre l'incertitude interne et externe.

4.2 Résultats d'imagerie

Afin d'optimiser le nombre de données à traiter, des conditions ont été combinées afin d'optimiser le nombre de données dans chacune des conditions générales « certitude » et « incertitude ». Afin de s'assurer que cette opération n'occasionne pas de perte de données, chacune des huit conditions ont d'abord comparées l'une à l'une mais sans différence significative, à l'exception d'un contraste. Ainsi, tous les

contrastes liés à certitude > incertitude (certain/bonne réponse > incertain/bonne réponse; certain/bonne réponse > incertain/mauvaise réponse; certain/mauvaise réponse > incertain/bonne réponse; certain/mauvaise réponse > incertain/bonne réponse) ont tout de même été analysés et ont donné les mêmes régions cérébrales que le contraste certitude > incertitude général (combinant toutes les conditions de certitude > toutes les conditions d'incertitude), soient les régions occipitales et pariétales. Par contre, quoique pour tous les autres contrastes liés à incertitude > certitude (incertain/bonne réponse > certain/mauvaise réponse; incertain/mauvaise réponse > certain mauvaise réponse; incertain/mauvaise réponse > certain bonne réponse) n'ait occasionné aucune activation significative, un seul contraste soit incertain/bonne réponse > certain/bonne réponse a montré une différence d'activation significative au niveau du cortex cingulaire antérieur (coordonnées $k = 51$; $x = -3$, $y = 30$, $z = 30$; $t = 4,93$; $p < 0,0005$, non corrigé, min.20 voxels). En d'autres mots, le fait d'être incertain et donner une bonne réponse active plus significativement le cortex cingulaire antérieur que le fait d'être certain et donner une bonne réponse.

Afin de comprendre les résultats obtenus, voici un bref rappel des hypothèses d'imagerie. À partir de la question de recherche, soit : « Quels sont les mécanismes cérébraux impliqués dans l'incertitude lors d'une prise de décision ? », l'hypothèse se divise en deux sections; la première étant que l'état d'incertitude montrerait un patron d'activations différent de l'état de certitude, la seconde étant que l'incertitude d'attribution interne et d'attribution externe seraient observés, impliquant quatre régions clés soit le cortex pariétal, le cortex frontal pour l'incertitude d'attribution interne, le cortex cingulaire antérieur et l'aire prémotrice supplémentaire pour celle d'attribution externe. Pour cette dernière hypothèse, une différenciation des régions activées est attendue, à savoir si l'incertitude est émise d'une attribution interne (un manque de connaissance) ou d'une attribution externe (la compréhension d'une règle d'association stimulus-réponse, par exemple).

Tableau 4.3 – Vue d'ensemble des résultats d'imagerie ($p < 0,0005$, non corrigé,
min 20 voxels, MNI coordonné en mm, L = left, R = right, LR = left and right) (Potvin et al. 2014)

Regions	k	x	y	z	t
Uncertainty > Certainty					
L middle/superior temporal gyrus (BA 21/22)	41	-63	-39	3	5.36
R superior frontal gyrus (BA 8/9)	34	9	54	45	5.32
LR anterior cingulate cortex (BA 24/32)	59	-3	36	21	4.86
L inferior frontal gyrus/superior temporal gyrus and insula (BA 47/38/13) – into the lateral sulcus	27	-36	15	-12	4.49
Certainty > Uncertainty					
LR from middle/inferior occipital gyrus and inferior temporal gyrus (BA 19/18/37, L peak) to angular gyrus (BA 39) and superior parietal lobule (BA 7/19)	1545	-45	-72	-3	8.40
LR inferior parietal lobule and postcentral gyrus (BA 40/2)	83	63	-24	42	6.31
R inferior/middle frontal gyrus (BA 44/8), insula (BA 13), and precentral gyrus (BA 4/6)	40	42	-3	24	5.27
L insula (BA 13) and precentral gyrus (BA 4/6)	38	-33	0	18	5.19
L insula (BA 13) and precentral gyrus (BA 4/6)	22	-48	0	6	4.62

4.2.1 Contraste certitude > incertitude

Étant donné que l'intérêt de cette recherche se porte d'abord sur l'incertitude, les résultats quant à l'état de certitude semblent intéressants dans la mesure où ils sont d'une part distincts de l'incertitude, et d'autre part parce qu'ils indiquent que lorsque les participants sont « certains » de leurs réponses, leur cerveau semble effectuer davantage de traitements visuels, par l'activation des régions occipitales, et qu'il ne semble pas y avoir de mobilisation de régions typiquement associées à la métacognition ou au contrôle cognitif qui sont plutôt frontales. En effet, les observations montrent des activations bilatérales significatives au cortex intrapariétal latéral, plus précisément dans la région postérieure, commençant avec le gyrus occipital vers le gyrus angulaire et le lobule pariétal supérieur.

4.2.2 Contraste incertitude > certitude

Cette section du chapitre expose donc les différentes activités neurologiques recueillies dans les conditions d'incertitude fusionnées. D'emblée, quatre régions semblent significativement plus actives dans le contraste *incertitude > certitude* ($p < 0,0005$, *uncorrected*, *min. 20 voxels*). La *Figure 4.1* et le *Tableau 4.3* indiquent d'abord que l'activité cérébrale la plus antérieure se trouve au gyrus supérieur frontal droit s'étendant au cortex préfrontal dorsolatéral droit (BA 8.9). Cette dernière région avait bel et bien été identifiée par l'hypothèse qui se voit ainsi confirmée. Une autre région identifiée dans l'hypothèse se voit confirmée par le résultat suivant, c'est-à-dire l'observation d'une activité cérébrale au cortex cingulaire antérieur bilatéral (BA 24.32). Deux autres régions non envisagées dans l'hypothèse se sont aussi manifestées. L'activité cérébrale la plus postérieure se situe pour sa part au gyrus temporal médian/supérieur gauche (BA 21.22), ainsi qu'à l'intersection du cortex insulaire antérieur gauche (insula), le gyrus temporal supérieur et le gyrus frontal inférieur (BA 13.38.47). Aucune activité cérébrale significative n'a été observée dans les lobes pa-

riétaux et occipitaux. Ainsi, en état d'incertitude, les participants démontrent qu'ils utilisent des régions associées autant à l'incertitude d'attribution interne qu'externe.

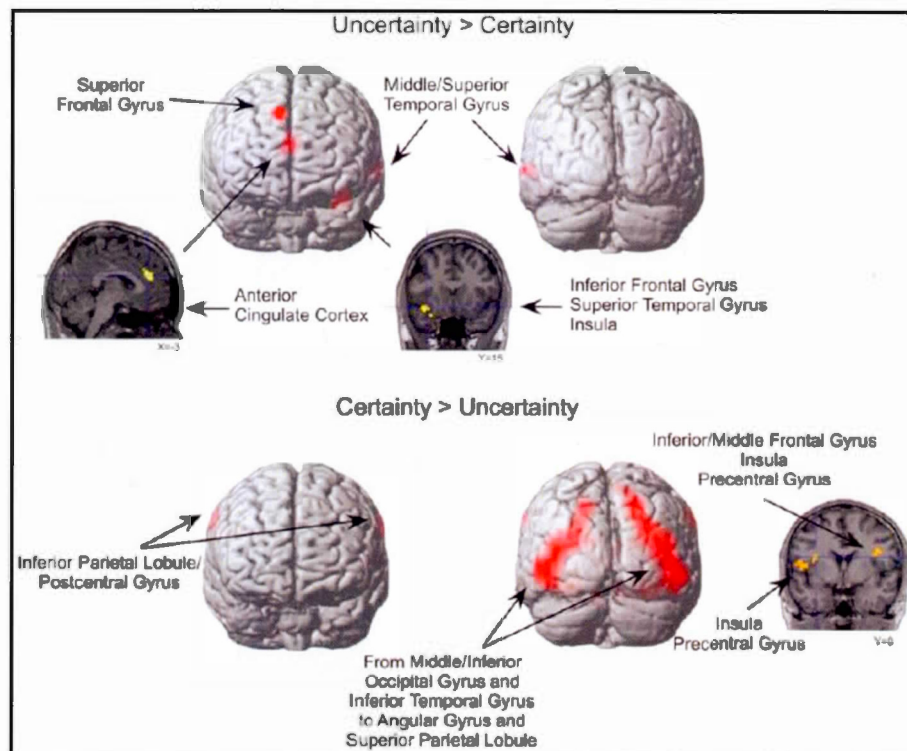


Figure 4.1 – Régions cérébrales activées lors du contraste incertitude > Certitude ainsi que certitude > incertitude ($p < 0,0005$, non corrigé, min 20 voxels) (Potvin et al. 2014)

CHAPITRE V

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Dans ce chapitre il sera question de proposer des interprétations quant aux résultats obtenus, puis d'apporter au domaine de recherche un éclairage nouveau sur le paradigme du changement conceptuel et ses applications pédagogiques potentielles.

5.1 Hypothèse 1 : certitude et incertitude

D'abord, les activations observées en situation d'incertitude contre celles en situation de certitude sont bel et bien différentes. La première hypothèse est donc confirmée. Ainsi, en situation de certitude, les participants utilisent des régions sensorielles et motrices du cerveau pour répondre à la tâche. À ce propos, une récente étude (Keifer et Pulvermüller, 2012) apporte une fort intéressante explication à ce constat. En effet, Keifer et al. (2012) proposent une explication théorique appelée « *embodiment theory* », laquelle s'oppose à l'idée cognitiviste que les concepts soient des représentations indépendantes et « amodales » dans le cerveau, détachées des lieux cérébrales d'où elles sont nées, en d'autres mots, des aires sensorielles et motrices. Au contraire, pour Keifer et al. (2012), un concept est fonctionnellement et neuroanatomiquement attaché aux perceptions et aux représentations motrices desquelles elles ont émergé dans le cerveau lors de l'acquisition : une conception est donc « modale ». Alors si l'on considère les résultats obtenus dans la présente recherche, tout porte à croire que les participants, lorsqu'en état de certitude, semblent plus enclin à opérer davantage de traitement visuel parce qu'ils utilisent des

conceptions entreposés fonctionnellement et anatomiquement dans ces régions depuis le moment de leur acquisition première, des concepts qu'ils croient maîtriser suffisamment pour en tirer une certitude.

En contre-partie, lorsqu'en situation d'incertitude, les participants n'utilisent pas ces régions cérébrales, mais plutôt des régions frontale et limbique pour traiter l'information et arriver à produire une réponse de laquelle ils demeurent incertains. On peut se rappeler les travaux d'Hasan (1999) qui proposaient que l'incertitude n'était non pas due au fait que les conceptions étaient erronées, mais plutôt à l'absence de conception (voir tableau 2.1). Les résultats semblent aller dans la direction de cette théorie, à savoir que dans l'incertitude, les participants n'ont pas utiliser les aires sensorielles et motrices de la même façon qu'en état de certitude, peut-être car ils ne s'y trouvaient pas les concepts nécessaires à la résolution du problème, comme le voudrait la théorie de Keifer et al. 2012 : les conceptions dont ils auraient eu besoin pour répondre avec certitude étaient peut-être tout simplement absentes. Ainsi, on observe les activations des activations au cortex préfrontal dorsolatéral en cas d'incertitude d'attribution interne et du cortex cingulaire antérieur en cas d'incertitude d'attribution externe, qui sont des régions plus souvent associées à l'apprentissage, à la mémoire de travail et au monitoring. L'incertitude semble amener les participants à raisonner différemment qu'en état de certitude, peut-être raisonner de façon plus métacognitive.

5.2 Hypothèse 2 : incertitude d'attribution interne et externe

Pour mieux comprendre ce que signifient les activations cérébrales d'intérêt observées sous condition d'incertitude, plusieurs études antérieures ont su démontrer le rôle de chacune de ces régions en termes de fonctions cognitives. Dans cette vision, les fonctions cognitives associées à chacune des régions sont compartimentées et rappelons que l'IRMf ne peut donner de résultat lié au moment de l'activation (aucune

résolution temporelle). On peut ainsi avancer l'hypothèse que les structures identifiées en situation d'incertitude sont activées de façon fonctionnellement coopérante.

5.2.1 Incertitude d'attribution interne

D'abord, l'hypothèse quant à l'incertitude d'attribution interne impliquait l'activation du gyrus frontal supérieur (BA 8) associée à l'activation d'une région située antérieurement à cette dernière, soit le cortex préfrontal dorsolatéral (BA 9). Les résultats confirment cette hypothèse (voir figure 4.2). À ce propos, plusieurs recherches ont montré le rôle de ces deux régions dans des activités métacognitives comme le contrôle de réponses automatiques (Nathaniel-James, 1997 ; Burgess et Shallice, 1996), la manipulation d'informations en mémoire de travail (Petrides 2000 ; 2005), l'émission d'une réponse libre sans règle pré-établie (Frith, Friston, Liddle et Frackowiak, 1991), l'activité de relier des informations retenues en mémoire de travail aux demandes d'une tâche (Kanwisher *et al.* 2000 ; Cabeza *et al.* 2003) et la surveillance quant au rappel de connaissance de la mémoire déclarative dans des situations de jugement sous incertitude (Henson *et al.* 2000 ; Cohen *et al.* 1997).

En somme, la tâche cognitive a su susciter l'incertitude d'attribution interne qui, rappelons-le, s'apparente au doute quant à ses propres connaissances sur un sujet, ce qui est largement l'objectif de l'enseignant lorsqu'il tente de faire évoluer l'écologie conceptuelle d'un apprenant. Ainsi, l'incertitude d'attribution interne qui a été observée dans les conditions expérimentales décrites en contexte scolaire indique que celle-ci pourrait jouer un rôle dans la mobilisation d'une vigilance métacognitive sur les réponses automatiques, comme des connaissances instinctives ou naïves, afin d'arrimer des connaissances antérieures aux demandes d'une tâche, et mener à un ajustement conceptuel. L'incertitude d'attribution interne permettrait probablement au participant de retenir et évaluer des informations en mémoire de travail lorsqu'il cherche à évaluer la réponse qu'il veut émettre.

5.2.2 Incertitude d'attribution externe

En ce qui concerne l'hypothèse quant aux activations en état d'incertitude d'attribution externe, l'activation du gyrus frontal supérieur (BA8) était attendue, associée cette fois à l'activation du cortex cingulaire antérieur (BA 24.32). Les résultats confirment aussi cette hypothèse alors qu'il avait été souhaité que les participants ne mobilisent pas ce type d'incertitude puisqu'elle est plutôt associée à un raisonnement externe, du type association stimulus-réponse, et non pas à une mobilisation de concepts pour résoudre le problème présenté par le stimulus.

Le cortex cingulaire antérieur est souvent associé à la détection d'erreurs ou d'un potentiel d'erreurs (Carter, Braver et Barch, 1998; Botvinick, Noll et Cohen, 1998 ; Gemba, Sasaki et Brooks, 1986 ; Deheane, Posner et Tucker, 1994, Botvinick, Nystrom, Fissell, Carter et Cohen, 1999), des réponses automatiques incompatibles ou incongruentes avec une tâche (MacLoed et MacDonald, 2000 ; Bench *et al.* 1993 ; Pardo *et al.* 1990), ou à l'évaluation d'une réponse correcte ou incorrecte (van Veen et Carter 2002 ; Critchley *et al.* 2003 ; Swick et Turken, 1999). Dans cette perspective, certains chercheurs affirment qu'au-delà de la détection d'erreur ou d'incongruence, le cortex cingulaire antérieur n'a pas d'autre rôle que la compensation ou l'ajustement du comportement cérébral en fonction de la tâche (Kerns, Cohen, MacDonald, Cho, Stenger et Carter, 2004). Pour eux, c'est le cortex préfrontal qui, dans un deuxième temps, est activé pour permettre l'ajustement du comportement de réponse, comme ralentir ou relire par exemples. Le rôle du cortex cingulaire antérieur serait donc limité à reconnaître l'incompatibilité d'une réponse dans un contexte particulier, d'évaluer si celle-ci est correcte ou incorrecte (MacLoed et MacDonald, 2000 ; van Veen et Carter, 2002).

5.2.3 Combinaison des deux types d'incertitude

Globalement, les résultats obtenus confirment que la tâche cognitive à laquelle ont été soumis les participants semble effectivement susciter l'incertitude, autant d'attribution interne que d'attribution externe, comme il était attendu, et que malgré toutes les précautions qui peuvent être entreprises, on peut penser qu'une tâche ne saurait isoler complètement un type d'incertitude de par la nature même du processus d'attribution causale qui est propre à chaque individu. Par extrapolation, il advient donc difficile de concevoir qu'un enseignant de sciences puisse créer des activités d'apprentissage ne suscitant qu'un seul type d'incertitude, idéalement d'attribution interne de type plus conceptuel. D'autres recherches devront se pencher sur ce phénomène et tenter de comprendre le processus par lequel un apprenant puisse rester dans la vigilance et le monitoring de l'incertitude d'attribution interne sans glisser vers l'automatisation d'une attribution externe de la simple association stimuli-réponses. Des recherches subséquentes pourraient se pencher sur cette question, à savoir comment mieux exploiter l'apprentissage associatif stimulus-réponse afin qu'il apparaisse au moment opportun dans le temps d'apprentissage et qu'il soit même enseigné directement via des trucs mnémoniques par exemple. Il semble qu'on ne puisse que difficilement l'éviter et qu'elle fasse peut-être partie de l'apprentissage.

5.3 Cortex insulaire antérieur gauche (insula)

Un autre résultat d'intérêt a su attirer l'attention et mérite une interprétation, soit l'activation de l'insula (BA 13). Dans les conditions de certitude, l'insula est activée en extension du gyrus précentral (BA 4/6), alors qu'en situation d'incertitude, les activités connexes sont les gyrus frontal inférieur (BA 47) et temporal supérieur (BA38). Compte tenu que l'insula soit une région activée dans les deux contextes, certitude et incertitude, cette région du cerveau ne semble donc pas associée spécifiquement à l'incertitude mais peut-être au fait d'avoir à prendre une décision, et/ou de vivre un

déséquilibre ou une dissonance cognitive (Festinger, 1957). Des recherches ont d'ailleurs montré que l'insula était active dans des tâches où le participant était placé devant des stimuli aversif (Sarinopoulos et al. 2009; Jung et al. 2013), ce qui amène à croire que la dissonance cognitive à elle seule, que l'on soit certain ou incertain, amène un inconfort suffisant qui pourrait expliquer les travaux de Fugelsang et al. (2005), à savoir l'apparition de comportement d'évitement, d'inhibition, voire de perte d'intérêt.

L'étude de Jung et al. (2013) propose même que la connectivité entre l'insula et certaines régions d'intérêt relatées dans cette recherche, à savoir le cortex cingulaire antérieur et le cortex frontal dorso-médian, serait foncièrement à la base des comportements reliés au fait d'avoir à faire un choix cognitif. En effet, dans les tâches où l'insula et le cortex cingulaire antérieur sont activées, comme ici dans les cas d'incertitude d'attribution externe, cette combinaison prédiraient des comportements de calcul de choix qui minimisent les pertes ou les erreurs; alors que dans les tâches où les activations de l'insula et le cortex préfrontal dorso-latéral sont combinées, on s'attendrait plutôt à des comportements liés à des stratégies de compensation (Jung et al. 2013), comme dans les situations d'attribution interne.

Enfin, les études de Hart, Berndt et Caramazza (1985) et Heilman, Crisan, Houser, Miclea et Miu (2010) permettent de suggérer une interprétation complémentaire. Selon eux, l'activation de régions préfrontales, de l'insula et du gyrus cingulaire serait un pré-requis essentiel pour les fonctions exécutives parce que d'une part, l'insula permettrait de ressentir l'émotion aversive devant des stimuli ambigus, ce qui pousserait l'individu à chercher des stratégies qui feraient diminuer cette ambiguïté (comportement d'atténuation) d'où l'activation des autres régions frontales, et d'autre part l'insula permettrait de provoquer l'inhibition de cette réponse émotionnelle afin d'améliorer le temps de réponse cognitive. Pour Hart et al. (1985), cette combinaison

d'activations, impliquant l'insula et d'autres structures frontales et cingulaire, sont essentielles au raisonnement dans des contextes ambigus ou aversifs puisqu'elles sont dynamiquement ajustées dans le but d'optimiser la performance, et diminuer la compétition entre les informations émotionnelles et cognitives, améliorant ainsi le traitement de ces dernières.

Au plan pédagogique, l'étude de Jung et al. (2013) peut inspirer une stratégie importante, soit la possibilité de demeurer dans l'incertitude et ainsi de ne pas avoir à se prononcer, dans le but de demeurer vigilant et engagé métacognitivement. En effet, dans la tâche de Jung et al. (2013), les participants pouvaient faire un choix parmi un choix de réponses, dans lequel l'une d'entre elle était « je passe » (traduction libre de « *pass* »). Les résultats de cette recherche montrent qu'en effet, lorsque les participants étaient incertains devant un stimulus ambigu, et qu'ils choisissaient « je passe », le cortex cingulaire antérieur était alors peu ou pas activé, au profit du cortex dorso-latéral donc d'une vigilance. Dans ce contexte, le cerveau des participants demeurait plus vigilant à développer des stratégies de compensation pour arriver à comprendre, et non plus dans l'émotion négative et l'aversion de la détection d'erreurs qui entre alors en compétition avec le traitement d'informations cognitives. Il pourrait ainsi être intéressant de permettre aux apprenants de rester dans l'état d'incertitude sans avoir à se prononcer, sans avoir à émettre qu'une seule hypothèse mais pouvoir en émettre plusieurs, par exemples. L'état d'incertitude d'attribution interne quant à ses conceptions pourrait peut-être ainsi demeurer plus longtemps dans le monitoring et la vigilance, ce qui pourrait retarder le passage inévitable à l'automatisation (Posner et al. 1997) et à la recherche de l'association simple du stimulus-réponse.

CHAPITRE 6

CONCLUSION

En somme, l'étude actuelle s'intéresse à mieux comprendre les mécanismes cérébraux impliqués dans l'incertitude lorsque des participants doivent émettre des réponses certaines ou incertaines quant à des stimuli de nature scientifique, dans le but de mieux comprendre le paradigme du changement conceptuel populaire issu de la didactique des sciences. Ce dernier fait la promotion de l'importance du choc cognitif, concept se rapprochant ici à l'incertitude étudiée, dans l'évolution de l'écologie conceptuelle des apprenants novices. En effet, plusieurs recherches populaires expliquent que sans un choc ou conflit cognitif, l'apprenant novice ne peut progresser conceptuellement. Malgré ce point d'encrage théorique fort, la difficulté à faire évoluer les conceptions d'élèves demeurerait, jusqu'à maintenant et encore, un défi de taille.

Or des recherches récentes utilisant les neurosciences ont démontré que ce conflit cognitif provoque des réponses qui entrent en compétition avec le traitement de l'information cognitive, comme des résistances. Plusieurs études, ainsi que l'étude actuelle, ont d'ailleurs montré que l'état d'incertitude pouvait mieux solliciter différentes régions du cerveau associées à l'apprentissage. À ce propos, ces études ont fait état de l'existence de deux types d'incertitude, soit l'incertitude d'attribution interne qui sollicite des structures frontales associées à des stratégies de compensation, de monitoring et de vigilance, soit l'incertitude d'attribution externe qui sollicite une structure cingulaire associée à la détection d'erreurs ou au calcul de

choix. Quoiqu'il apparaisse souhaitable de solliciter l'incertitude d'attribution interne lorsque l'on cherche à faire apprendre de nouveaux concepts théoriques en science, les résultats de cette étude ont montré qu'il est probablement inévitable d'avoir à négocier avec les deux types d'incertitude, et que la dynamique entre ces deux types soient encore peu connue. Il pourrait donc être favorable de laisser les apprenants vivre une dose d'incertitude quant à des événements, des phénomènes observés, par exemple sans avoir à leur demander de se prononcer rapidement, puisque le maintien d'un état d'incertitude (voire par la possibilité de choisir « je passe mon tour pour le moment ») permettrait au cerveau de rester vigilant quant aux stratégies de compensation, et probablement rester plus intéressé à comprendre, moins enclin à automatiser ou à solliciter des conceptions naïves pour diminuer un conflit cognitif. Les cours de sciences et de technologies deviendraient alors peut-être moins aversifs pour l'apprenant, moins confrontationnels, et plus près de la curiosité scientifique réelle qui se fait par la recherche.

Pour de futures recherches, il pourrait être intéressant de voir comment s'articule la dynamique entre l'incertitude d'attribution interne et externe, et comment se module l'apparition des comportements d'automatisation. Il serait aussi pertinent de mieux comprendre comment amener un apprenant vers un état d'incertitude qui stimule la vigilance et la remise en question de ces conceptions alternatives, voire à tester des stratégies d'enseignement ou d'apprentissage qui mobilisent les régions pertinentes au lieu de l'amener à faire du traitement d'informations aversives : y a-t-il des entraînements aux erreurs qui pourraient amener un apprenant à mieux négocier cette charge émotionnelle? Enfin, le but étant aussi de susciter l'intérêt des jeunes envers les sciences, il pourrait s'avérer intéressant de voir comment le fait de mieux gérer cette réaction émotionnelle aux effets aversifs de certains apprentissages scientifiques améliore le plaisir d'apprendre les sciences et l'intérêt pour une carrière scientifique.

RÉFÉRENCES

- Anderson, B.F., D.H. Deane, K.R. Hammond, M.H. Gary et S.C. James (1981), *Concepts in judgment and decision research. Definitions, sources, interrelations, comments.* Colorado: Defense Technical Information Center OAI-PMH Repository.
- Ashburner, J. et K.J. Friston (2005), « Unified segmentation » [doi: DOI: 10.1016/j.neuroimage.2005.02.018], *NeuroImage*, 26(3), 839-851.
- Astolfi, J.P. (2005), Problèmes scientifiques et pratiques de formation, *Raisons Éducatives*. En ligne (consulté en janvier 2012) : < <http://www.Cairn.info> >.
- Ates, S. et E. Cataloglu (20075), « The effects of students' reasoning abilities on conceptual understandings and problem-solving skills in introductory mechanics », *European Journal of Physics*, 28, 1161-1171.
- Bench, C.J., C.D. Frith, P.M. Grasby, K.J. Friston, E. Paulesu et R.S.J. Frackowiak (1993), « Investigations of the functional anatomy of attention using Stroop test », *Neuropsychologia*, 31, 907-922.
- Besnier, J.-M. (2005), *Les théories de la connaissance*, Paris: Presses universitaires de France, coll. « Que sais-je ? ».
- Boivin I. et A. Marchand (1996), *Évaluation structurée pour les troubles anxieux du DSM-IV*, Montréal: Université du Québec à Montréal, Département de psychologie.
- Botvinick, M. et J. Cohen (1998), « Rubber hands « feels » touch that eyes see », *Nature*, 391, 756.
- Botvinick, M., L.E. Nystrom, K. Fissell, C.S. Carter et J.D. Cohen (1999), « conflict monitoring versus sélection-for-action in anterior cingulate cortex », *Nature*, 402(67658), 179-181.
- Burgess, P.W. et T. Shallice (1996), « Confabulation and the control of recollection », *Memory*, 4, 359-411.
- Bybee, R.W. (1982), « Citizenship and Science Education », *The American Biology Teacher*, 44(6), 337-345+368.

- Cabreza, R., F. Dolcos, S.E. Prince, H.J. Rice, D.H. Weissman et L. Nyberg (2003), «Attention-related activity during episodic memory retrieval: A cross-function fMRI study», *Neurpsychologia*, 41, 390-399.
- Carter, C.S., T.S. Braver, D.M. March, M.M. Botvinick, D. Noll et J.D. Cohen (1998), «Anterior cingulate cortex, error detection, and the online monitoring of performance », *Science*, 280, 747-749.
- Çepni, S. et Esra Keles (2006), « Turkish students' conceptions about the simple electric circuits », *International Journal of Science and Mathematics Education*, 4, 269-291.
- Chi, M.T.H. (1992), « Conceptual Change Within and Across Ontological Categories : Examples from Learning and Discovery in Science », dans I.R.G. (Ed.), *Cognitive Models of Science: Minnesota Studies in Philosophy of Science* (p. 129-186), Minneapolis, MN : University of Minnesota Press.
- Chua, E., D.L. Schacter, E. Rand-Giovannetti et R.A. Sperling (2006), « Understanding Metamemory : Neural Correlates of the Cognitive Process and Subjective Level of Confidence in Recognition Memory », *NeuroImage*, 29(4), 1150-1160.
- Cohen, J.D., W.M. Perstein, T.S. Braver, L.E. Nystrom, D.C. Noll, J. Jonides et E.E. Smith (1997), « Temporal dynamics of brain activation during a working Memory task », *Nature*, 386, 604-607.
- Confrey, J. (1997), « A Review of the Research on Student Conceptions in Mathematics, Science, and Programming », dans C. B. Cazden (Ed.), *Review of Research in Education* (vol. 16, p. 3-56), Washington, NW : American Educational Research Association.
- Critchley, H.D., C.J. Mathias, O. Josephs, J. O'Doherty, S. Zanini, B.K. Dewar, L. Cipolotti, T. Shallice et R.J. Dolan (2003), « Human cingulate cortex and auto-evidence », *Brain*, 126, 2139-2152.
- CST (2002), *La culture scientifique et technique au Québec : Bilan*, Québec : Gouvernement du Québec.
- CST (2010), *Innovation ouverte : Enjeux et défis pour le Québec, Rapport de conjoncture 2009*, Québec : Gouvernement du Québec.
- D'ambrosio, U. (1992), « Science, Mathematics, Engineering and Technology education for the 21st century. Summer Symposium on education for citizenship in the 21st century. Finale Report. » National Science Foundation, Washington, D.C.

- Dehaene, S., M.L. Posner et D.M. Tucker (1994), « Localisation of a neural system for error detection and compensation », *Psychological Science*, 5, 303-305.
- Dewey, J. (1910), *How we think*, Boston : Heath.
- Dimopoulos, K. et Y. Koulaidis (2002), « science and technology education for citizenship: the potential role of the press », *Wiley Periodicals inc.*, 241-256.
- di Sessa, A. (1988), « Knowledge in Pieces », dans G. F. et P. B. Pufall (Ed.), *Constructivism in the Computer Age* (p. 49-70), NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- Dole, J.A. et G.M. Sinatra (1998), « Reconceptualizing Change in the Cognitive Construction of Knowledge, *Educational Psychologist*, 33, 109-128.
- Dreyfus, A., E. Jungwirth et R. Eliovitch (1990), « Applying the "Cognitive Conflict" Strategy for Conceptual Change – Some Implications, Difficulties, and Problems », *Science Education*, 74(5), 555-569.
- Driver, R. (1989), « Students' Conceptions and the Learning of Science, *International Journal of Science Education*, 1(5), 481-490.
- Duit, R. (1991), « Students' Conceptual Frameworks : Consequences for Learning Science », dans R.H. Yeany, B.K. Britton et S.M. Glynn (Ed.), *The Psychology of Learning Science*, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- Duit, R. et C. von Rhoneck (1998), « Learning and understanding key concepts of electricity », dans A. Thibergien, L. Jossem et B. Jorge (Eds.), *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education*, The International Commission on Physics Education.
- Duit, R. et D.F. Treagust (2003), « Conceptual Change : a Powerful Framework for Improving Science Teaching and Learning », *International Journal of Science Education*, 25(6), 671-688.
- Dykstra, D.I. Jr., C.F. Boyle et I.A. Monarch (1992), « Studying Conceptual Change in Learning Physics », *Science Education*, 76, 615-652.
- Erikson, C.W., M.D. Pollack et W.E. Montague (1970), « Implicit speech: Mechanisms in perceptual encoding? », *Journal of Experimental Psychology*, 84, 502-507.
- Ferreira, M.B., L. Garcia-Marques, S.J. Sherman et J.W. Sherman (2006), « Automatic and Controlled Components of Judgment and Decision Making », *Journal of Personality and Social Psychology*, 91(5), 797-813.

- Fernandez-Duque, D., J.A. Baird et M.I. Posner (2000), « Executive Attention and Metacognitive Regulation », *Consciousness and Cognition*, 9, 288-307.
- Festinger, L. (1957), *A Theory of Cognitive Dissonance*, New York : Harper and Row.
- Feynman, R.P. (1998), *The Meaning of it All : Thoughts of a Citizen Scientist*, Reading, MA : Perseus Books.
- Fourez, G. (1998), « Se représenter et mettre en oeuvre l'interdisciplinarité à l'école », *Revue des sciences de l'éducation*, XXIV(1), 31-50.
- Frith, C.D., K. Friston, P.F. Liddle et R.S.J. Frackwiak (1991), « Willed action and prefrontal cortex in man : a study with PET », *Proceedings of the Royal Society of London*, 244, 241-246.
- Friston, K., C.J. Price, P.Fletcher, C. Moore, R.S.J. Frackwiak et R.J. Dolan (1996), « The trouble with cognitive subtraction », *NeuroImage*, 4, 97-104.
- Fugelsang, J.A. et K.N. Dunbar (2005), « Brain-Based Mechanisms Underlying Complex Causal Thinking », *Neuropsychologia*, 43, 1204-1213.
- Gemba, H., H. Sasaki et V.B. Brooks (1986), « Error potential in limbic cortex (anterior cingulate area 24) of monkeys during motor learning », *Neuroscience Letters*, 70, 223-227.
- Gigerenzer, G. et P.M. Todd (1999), *Simple Heuristics That Make Us Smart*, New York : Oxford University Press.
- Good, C.D., I.S. Johnsrude, J. Ashburner, N.A. Henson, K.J. Friston et R.S.J. Frackowiak (2001), « A Voxel-Based Morphometric Study of Ageing in 465 Normal Adult Human Brains », *NeuroImage*, 14, 21-36.
- Gorgio, A., K.E. Watkins, M. Chadwick, L. Winmill, G. Douaud, N. De Stefano, P.M. Matthews, S.M. Smith, H. Johansen-Berg et A.C. James (2009), « Longitudinal Changes in Grey and White Matter During Adolescence », *NeuroImage*, 49, 94-103.
- Gouvernement du Québec (2003), *Programme de formation de l'école québécoise. Enseignement secondaire premier cycle*, Québec : Ministère de l'Éducation.
- Gouvernement du Québec (2004), « Panorama sur le Québec : science et technologie », *Portail du gouvernement du Québec*. En ligne : <http://www.panorama-quebec.com/cgi-cs/cs.waframe.content?topic=27109&lang=1> ».
- Gunstone, R.F. et A.B. Champagne (1990), « Promoting Conceptual Change in the Laboratory », dans E. Hegarty-Hazel (Ed.), *The Student Laboratory and the Science Curriculum*, Londres et New York : Routledge.

- Hart, J., R.S. Berndt et A. Caramazza (1985), « Category-specific naming deficit following cerebral infarction », *Nature*, 316, 439-440.
- Hasan, G., D. Bagayoko et E. Kelley (1999), « Alternative Conceptions and the Certainty of Response Index (CRI) », *Physics education*, 34, 294-299.
- Hasni, A. (2005), « La culture scientifique et technologique à l'école : de quelle culture s'agit-il et quelles conditions mettre en place pour la développer ? », dans P. U. Laval (Ed.), *L'enseignement profession intellectuelle* (vol. XIV, p. 229), Sainte-Foy.
- Heilman, R.M., L.G. Crisan, D. Houser, M. Miclea et A.C. Miu (2010), « Emotion Regulation and Decision Making Under Risk and Uncertainty », *Emotion*, 10(2), 257-265.
- Houdé, O., L. Zago, E. Mellet, S. Moutier, A. Pineau, B. Mazoyer *et al.* (2000), « Shifting from the Perceptual Brain to the Logical Brain : The Neural Impact of Cognitive Inhibition Training » *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(5), 721-728.
- Houdé, O., L. Zago, F. Crivello, S. Moutier, A. Pineau, B. Mazoyer *et al.* (2001), « Access to Deductive Logic Depends on a Right Ventromedial Prefrontal Area Devoted to Emotion and Feeling : Evidence from a Training Paradigm », *NeuroImage*, 14, 1486-1492.
- Henson, R.N.A., T. Shallice et R.J. Dolan (1999), « Right Prefrontal Cortex and Episodic Memory Retrieval : a Functional MRI Test of the Monitoring Hypothesis », *Brain*, 122, 1367-1381.
- Henson, R.N.A., M.D. Rugg et Shallice (2000), « Confidence in Recognition Memory for Words Dissociating Right Prefrontal Roles in Episodic Retrieval », *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12 (6), 913-923.
- Hewson, P. W. et M.G. Hewson (1984), « The Role of Conceptual Conflict in Conceptual Change and the Design of Science Instruction », *Instructional Science*, 13, 1-13.
- Huettel, S.A., A.W. Song et G. McCarthy (2005), « Decisions under Uncertainty : Probabilistic Context Influences Activation of Prefrontal and Parietal Cortices », *The Journal of Neuroscience*, 25(13), 3304-3311.
- Jaakkola, T., S. Nurmi et K. Veermans (2011), « A comparison of students' understanding of electrical circuits in simulation only and simulation-laboratory contexts », *Journal of Research in Science Teaching*, 48(1), 71-93.

- Jung, Y.C., Schulte, T., Müller-Oehring, E.M., Hawkes, W., Namkoong, K., Pfefferbaum, A. et Sullivan, V. (2013). « Synchrony of anterior cingulate and insular-striatal activation predicts ambiguity aversion in individuals with low impulsivity », *Cerebral Cortex*, 25(5), 1397-1408.
- Kahneman, D. et A. Tversky (1982), « Variants of Uncertainty », *Cognition*, 11, 143-157.
- Kanwisher, N. et E. Wojciulik (2000), « Visual attention: insights from brain imaging », *Nature Reviews Neuroscience*, 17, 4302-4311.
- Kerns, J.G., J.D. Cohen, A.W. MacDonald, R.Y. Cho, V.A. Stenger et C.S. Carter (2004), « Anterior cingulate conflict monitoring and adjustment in control », *Science*, 303, 1023-1026.
- Kiefer, M.R. et F. Pulvermüller (2012), « Conceptual representations in mind and brain: Theoretical developments, current evidence and future directions », *Cortex*, 48(7), 805-825.
- Kim, H. et R. Cabeza (2009), « Common and specific brain regions in high versus low-confidence recognition memory », *Brain Research*, 1282, 103-113.
- Kirch, S.A. (2009), « Identifying and Resolving Uncertainty As a Mediated Action in Science : A Comparative Analysis of the Cultural Tools Used by Scientists and Elementary Science Students at Work », *Science Education*, 94, 308-335.
- Kolsto, S.D. (2001), « Scientific Literacy for citizenship: tools for dealing with the science dimension of controversial socioscientific issues », *Issues and Trends, Sci Ed*, 85, 291-310.
- Koriat, A. (1993) « How Do We Know What We Know? The Accessibility Model of the Feeling of Knowing », *Psychological Review*, 100, 609-639.
- Koriat, A. et M. Goldsmith (1996), « Monitoring and Control Processes in the Strategic Regulation of Memory Accuracy », *Psychological Review*, 103, 490-517.
- Krain, A. L., S. Hefton, D. Pine, M. Ernst, F.X. Castellanos, R.G. Klein et M.P. Milham (2006), « An fMRI Examination of Developmental Differences in the Neural Correlates of Uncertainty and Decision-Making », *The Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 47(10), 1023-1030.
- Krain, A.L., S. Hefton, D. Pine, M. Ernst, F.X. Castellanos et M.P. Milham (2008), « A Functional Magnetic Resonance Imaging Investigation of Uncertainty in Adolescents with Anxiety Disorders », *Biological Psychiatry*, 63(6), 563-568.
- Kuhn, T. S. (1962), *The Structure of Scientific Revolutions* (2nd ed.), Chicago : University of Chicago Press.

- Lakatos, I. (1970), *Falsification and the Methodology of Scientific Research Programs*, Cambridge : Cambridge University Press: I. Lakatos & A. Musgrave (Eds).
- Legendre, M.F. (1994), « Problématique de l'apprentissage et de l'enseignement des sciences au secondaire : un état de la question », *Revue des sciences de l'éducation*, 20(4), 657-677.
- Lee, G., J. Kwon, S.S. Park et J.W. Kim (2003), « Development of an Instrument for Measuring Cognitive Conflict in Secondary Level Science Classe », *Journal of Research in Science Teaching*, 40(6), 585-603.
- Limon, M. (2001), « On the Cognitive Conflict as an Instructional Strategy for Conceptual Change: a Critical Appraisal », *Learning and Instruction*, 11, 357-380.
- Lipshitz, Raanan et Orna Strauss (1997), « Coping With Uncertainty : A Naturalistic Decision-Making Analysis », *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 69(2), 149-163.
- Liu, X. (2001), « Synthesizing Research on Student Conceptions in Science », *International Journal of Science Education*, 23(1), 55-81.
- Limon, M. et M. Carretero (1997), « Conceptual change and anomalous data: a case study in the domain of natural science », *European Journal of Psychology Education*, 12(2), 213-230.
- Limon, M. (2004), Influence of prior domain specific knowledge in personal epistemology: paper presented at the 4th European meeting in conceptual change. Athens, Greece, May.
- MacLoed, C.M. et P.A. MacDonald (2000), « Interdimensional interference in Stroop effect: uncovering the cognitive and neural anatomy of attention », *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 383-391.
- Masson, S. (2012), « Étude des mécanismes cérébraux liés à l'expertise scientifique en électricité à l'aide de l'imagerie par resonance magnétique fonctionnelle », thèse doctorale, Université du Québec à Montréal, Canada.
- McDermott, L. et P.S. Shaffer (1992), « Research as a guide for curriculum development: an example from introductory electricity ». Part I. Investigation of student understanding », *American Journal of Physics*, 60(11), 994-1003.
- Martinand, J.L. (2001), « Pratiques de référence et problématique de la référence curriculaire », dans A. Terrisse (Ed.), *Didactique des disciplines : les références au savoir*, (p. 17-24), Bruxelles : De Boeck.

- Merenluoto, K. et E. Lehtinen (2002), *Certainty Bias as an Indicator of Problems in Conceptual Change : The Case of the Numberline*. Paper presented at the Proceedings of the 26th annual conference of the international group for the psychology of mathematics education, University of East Anglia, Norwich, UK.
- Murray, F. B. (1983), « Equilibration as Cognitive Conflict », *Developmental Review*, 3(54-61).
- Nadeau, R. et J. Désautels (1984). *Epistémologie et didactique des sciences*, Ottawa : Conseil des sciences du Canada.
- Nathaniel-James, D.A., P. Fletcher et C.D. Frith (1997), « The functional anatomy of verbal initiation and suppression using the Hayling test », *Neuropsychologia*, 35, 559-566.
- Novak, J. D., J.H. Wandersee et J.J. Mintzes (1994), « Research on Alternative Conceptions in Science », dans *Handbook of Research on Science Teaching and Learning* (Chapter 5), New York. NY : Macmillan.
- Nussbaum, E. M. et S. Novick (1982), « Alternative Frameworks, Conceptual Conflicts and Accommodation : Toward a Principled Teaching Strategy », *Instructional Science*, 11, 183-200.
- Nussbaum, E. M. et G.M. Sinatra (2003), « Argument and Conceptual Engagement », *Contemporary Educational Psychology*, 28, 384-395.
- OCDE. (2006), *Perspectives de l'OCDE de la science, de la technologie et de l'industrie*, Paris.
- OCDE. (2007), « Regards sur l'éducation », *Rapport annuel*, Paris.
- Oliva, J.M. (1999), « Structural Patterns in Students' Conceptions in Mechanics », *International Journal of Sciences Education*, 21, 903-920.
- Pardo, J.V., P.J. Pardo, K.W. Janer et M.E. Raichle (1990), « The anterior cingulate cortex mediates processing selection in the Stroop attentional conflict paradigm », *Processing of the National Academy of Science*, 87, 256-259.
- Petrides, M. (2000), *Middorsolateral and midventrolateral prefrontal cortex: two levels of executive control for the processing of mnemonic information*. Dans S. Monsell et J. Driver, *Attention and performance XVIII: control of cognitive performance*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Petrides. M. (2005), « Lateral prefrontal cortex: Architectonic and functional organization », *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 360, 781-795.

- Piaget, J. (1964), « Development and Learning », *Journal of Research in Science Teaching*, 2, 176-186.
- Ping Lim, C. (2008), « Global citizenship education, school curriculum and games: learning mathematics, English and Science as a global citizen », *Computer and Education*, 51, 1073-1093.
- PISA (2006), *Les compétences en sciences, un atout pour réussir*, Paris : OCDE.
- Planinic, M., W.J. Boone, R. Krsnik et M.L. Beilfuss (2006), « Exploring Alternative Conceptions from Newtonian Dynamics and Simple DC Circuits : Links Between Item Difficulty and Item Confidence », *Journal of Research in Science Teaching*, 43(2), 150-171.
- Posner, G. J., K.A. Strike, P.W. Hewson et W.A. Gertzog (1982), « Accommodation of a Scientific Conception : Toward a Theory of Conceptual Change », *Science Education*, 66(2), 211-227.
- Posner, M. I., G.J. DiGirolamo et D. Fernandez-Duque (1997), « Brain Mechanisms of Cognitive Skills », *Consciousness and Cognition*, 6, 267-290.
- Potgeiter, M., E. Malatje, E. Gaigher et E. Venter (2010), « Confidence Versus Performance as an Indicator of the Presence of Alternative Conceptions and Inadequate Problem-Solving Skills in Mechanics », *International Journal of Sciences Education*, 32(11), 1407-1429.
- Potvin, P. et M. Thouin (2003), « Étude qualitative d'évolutions conceptuelles en contexte d'explorations libres en physique-mécanique au secondaire », *Revue des sciences de l'éducation*, 29(3), 525-544.
- Potvin, P., M. Riopel, S. Masson et F. Fournier (2010), « Problem-Centered Learning vs. Teaching-Centered Learning in Science at the Secondary Level : An Analysis of Dynamics of Doubt », *Journal of Applied Research On Learning*, 3(5), 1-24.
- Potvin, P., J. Mercier, P. Charland et M. Riopel (2012), « Does Classroom Explication of Initial Conceptions Favour Conceptual Change Or Is It counter-Productive? », *Research in Science Education*, 42(3), 401-414.
- Potvin, P., Turmel, E. et S. Masson (2014), « Linking neuroscientific research on decision making to educational context of novice students assigned to multiple-choice scientific task involving misconceptions about electrical circuits », *Frontier Human Neuroscience*, 8, 14.
- Rohen M. et M. Eliahu (2000), « Simulation – A Bridge Between Theory and Reality. The Case of Electric Circuits », *Journal of Computer Assisted Learning*, 16, 14-26.

- Ryder, J. (2002), « School Science Education for Citizenship: Strategies for Teaching about the Epistemology of Science », *Journal of Curriculum Studies*, 34(6), 637-658.
- Ruel, E. (1994), *La complexification conceptuelle des représentations sociales discursives à l'égard de l'apprentissage et de l'enseignement chez les futurs enseignants et enseignantes en sciences*. Thèse de doctorat, Faculté des sciences de l'éducation, Université Laval, Québec.
- Sarinopoulos, I., D.W. Grupe, K.L. Maackiewicz, J.D. Herrington, M. Lor et E.E. Steege et J.B. Nitschke (2009), « Uncertainty during anticipation modulates neural response to aversion in Human Insula and Amigdal », *Cerebral Cortex*, doi:10.1093/cercor/bhp155.
- Segalowitz S.J. et P.L. Davies (2004), « Charting the Maturation of the Frontal Lobe : an Electrophysiological Strategy », *Brain and cognition*, 55, 116-133.
- Schindel Dimick, A. (2012), « Student Empowerment in an Environmental Science Classroom : Toward a Framework for Social Justice Science Education », *Science Education*, 96(6), 990-1012.
- Shipstone, D.M. (1984), « A Study of Children's Understanding of Electricity in Simple DC Circuits », *European Journal of Science Education*, 6(2), 185-198.
- Smith, G.F., P.G. Benson et S.P. Curley (1991), « Belief, knowledge and uncertainty : a cognition perspective on subjective probability », *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 48(2), 291-321.
- Somell, E.R., D. Delis, J. Stiles et L. Jernigan (2001), « Improved Memory Functioning and Frontal Lobe Maturation Between Childhood and Adolescence : A Structural MRI Study », *Journal of the International Neuropsychological Society*, 7, 312-322.
- Shallice, T. (2001), « Deconstructing Retrieval Mode », dans M. Naveth-Benjamin, M. Moscovitch, & H.L. Reodiger III (Eds), *Perspectives on Human Memory and Cognitive Aging: Essays in Honour of Fergus Craik* (1240134), Ann Arbor : Edwards Brothers.
- Strike, K. A. et G.J. Posner (1982), « Conceptual Change and Science Teaching », *European Journal of Science Education*, 4(3), 231-240.
- Swick, D. et A.U. Turken (1999), « Dissociation between Conflit Detection and Error Monitoring in the Human Anterior Cingulate Cortex », *Proceedings of the National Academy of Science*, 99, 16354-16359.
- Toulmin, S. (1972), *Human understanding*, Princeton : Princeton University Press.

- Tulving, E. et S.A. Madigan (1970), « Memory and Verbal Learning », *Annual Review of Psychology*, 21, 434-437.
- Van Veen, V. et C.S. Carter (2002), « The Anterior Cingulate as a Conflict Monitor : fMRI and ERP studies », *Physiology of Behavior*, 77(4-5), 477-482.
- Vermersch, P. (1994), *Pratiques de l'entretien d'explicitation*, Paris : ESF.
- Volz, K.G., R.T. Schubotz et D.Y. von Cramon (2003), « Predicting Events of Varying Probability : Uncertainty Investigated by fMRI », *NeuroImage*, 19(2), 271-280.
- Volz, K.G., R.I. Schubotz et D.Y. von Cramon (2004), « Why Am I Unsure ? Internal and External Attributions of Uncertainty Dissociated by fMRI », *NeuroImage*, 21, 848-857.
- Volz, K.G., R.I. Schubotz et D.Y. von Cramon (2005), « Variants of Uncertainty in Decision-Making and their Neural Correlates », *Brain Research Bulletin*, 67, 403-412.
- Vosniadou, S. (1994), « Capturing and Modeling the Process of Conceptual Change », *Learning and Instruction*, 4, 45-70.
- Wandersee, J.H., J.J. Mintzes et J.D. Novak (1994), « Research on Alternative Conceptions in Science », dans D.L. Gabel (Ed.), *Handbook of Research on Science Teaching and Learning* (p. 177-210), New York : Macmillan.
- Wang, T. et T. Andre (1991), « Conceptual Change Text versus Traditional Text and Application Questions versus no Question in Learning about Electricity », *Contemporary Educational Psychology*, 16(2), 103-116.
- Ward, J. (2010), *The Student's Guide to Cognitive Neuroscience*, New York : Psychology Press.
- West, L.H.T. et L. Pines (1984), « An Interpretation of Research in "Conceptual Understanding" Within a Source-Of-Knowledge Framework », *Research in Science Education*, 14, 47-56.

APPENDICE A

ADIS-IV CONDENSÉ : TEST DE DÉPISTAGE DES TROUBLES ANXIEUX

Voir photocopie de la première page de l'instrument. Pour obtenir l'instrument au complet, contacter les auteurs (voir référence bibliographique)

Nom: _____

Date: _____

No. Dossier: _____

Évaluateur: _____

ADIS-IV Condensé**Trouble panique**

- 1) Présence actuelle de poussées d'anxiété soudaine très intense - impression que quelque chose de grave va se produire? Attaque la plus récente?
- 2) Quelles situations? Inattendues et spontanées?
- 3) Combien de temps avant que l'anxiété devienne intense (moins de 10 min.)?
- 4) Combien de temps dure l'anxiété à son niveau plus élevé?
- 5) Symptômes ressentis: encercler symptômes pertinents et coter sévérité de 0 à 8

Symptômes	Sévérité
a) souffle court ou sensation d'étouffement b) étranglement c) palpitations d) douleur thoracique e) transpiration abondante f) étourdissement, vertige, perte d'équilibre g) nausée, maux de ventre h) dépersonnalisation / irréalité i) engourdissement, picotements j) bouffées de chaleur / frissons k) tremblements / tension musculaire l) peur de mourir m) peur de devenir fou / perdre le contrôle n) autres:	

- Ressentis à chaque attaque de panique ou non? Présence d'attaques à symptômes limités (mini-crisés)? Spécifier symptômes des attaques limitées (moins de 4 symptômes).
- 6) Nombre d'attaques au cours du dernier mois / des 6 derniers mois?
 - 7) Anticipation à propos d'autres paniques au cours du dernier mois? Sévérité actuelle de l'anticipation 0-8?
 - 8) Événements anticipés à la suite d'une attaque de panique: crise cardiaque, étouffement, mourir, devenir fou, perdre le contrôle, s'évanouir, tomber, avoir l'air fou, devenir paralysé ou aveugle?
 - 9) Changements dans le comportement résultant des crises (éviter, fuite, sensibilité interoceptive, comportements sécurisants, distraction, changement style de vie)? Coter détresse et interférence de 0 à 8.

APPENDICE B

COUPON DE PARTICIPATION : ÉTAPE DE RECRUTEMENT POUR L'IMAGERIE CÉRÉBRALE

Projet en neuroimagerie – UQAM

J'aimerais participer au projet de recherche! Voici mes coordonnées :

Prénom, Nom : _____

Courriel : _____

No Tel : _____

Âge : _____ Sexe : F _____ M _____

Programme : _____

APPENDICE C

FORMULAIRE DE DÉPISTAGE UNF : DÉPISTAGE PRÉLIMINAIRE POUR ÉTUDE D'IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE (IRM)

**DÉPISTAGE PRÉLIMINAIRE POUR ÉTUDE D'IMAGERIE PAR RÉSONANCE
MAGNÉTIQUE (IRM)**

Veuillez écrire en caractère d'imprimerie

Nom :	Prénom :
Date de naissance :	Sexe : F <input type="checkbox"/> M <input type="checkbox"/>
(jour/mois/année)	Poids : ___ kg ___ lbs
	Grandeur : ___ m ___ pi
Chercheur (e) / Projet :	Numéro d'identification :

Afin d'assurer la sécurité de toute personne accédant au territoire de l'UNF, il est très important que ce questionnaire soit complété correctement.

1. Avez-vous déjà subi une opération ?

	Non	oui	Si oui, veuillez préciser le type d'opération et la date :
Tête			
Thorax ou cœur			
Abdomen			
Bras, mains			
Jambes, pieds			
Colonne vertébrale			
Yeux			
Autres :			

2. Portez-vous :

	non	oui
Stimulateur cardiaque (Pace-maker) ?		
Électrodes épicaudiques ?		
Clip pour anévrisme cérébral ?		
Prothèse cochléaire ? Prothèse auditive ?		
Filtre ou cathéter dans un vaisseau sanguin ?		
Neurostimulateur ?		
Stimulateur électronique pour les os ?		
Prothèse valvulaire cardiaque ?		
Corps étrangers métalliques ? (ex: balles, fragments d'obus, éclats métalliques)		
Pompe à insuline implantée ?		
Prothèse orthopédique ? (ex: clou, vis, plaque)		
Membre (s) artificiel (s) ?		
Maquillage permanent ? Tatouage(s) ?		

APPENDICE D

TABLEAU DÉTAILLÉ DE L'ÉCHANTILLONNAGE

N° du sujet	Genre	Âge	Programme	Établissement
01	Féminin	19 ans	Technique d'éducation à l'enfance	Cégep Gérard-Godin, formation continue
02	Féminin	20 ans	Technique d'éducation à l'enfance	Cégep Gérard-Godin, formation continue
03	Féminin	18 ans	Danse	Cégep de Saint-Laurent
04	Féminin	18 ans	Sciences humaines	Collège Jean-de-Brébeuf
05	Féminin	18 ans	Danse	Cégep de Saint-Laurent
06	Féminin	18 ans	Danse	Cégep de Saint-Laurent
07	Masculin	18 ans	Sciences humaines	Collège Jean-de-Brébeuf
08	Féminin	18 ans	Art dramatique	Cégep de Saint-Laurent
09	Féminin	19 ans	Art dramatique	Cégep de Saint-Laurent
10	Féminin	20 ans	Danse	Cégep de Saint-Laurent
11	Masculin	19 ans	Sciences humaines	Collège Ahuntsic
12	Féminin	19 ans	Art dramatique	Cégep de Saint-Laurent
13	Masculin	18 ans	Sciences humaines – ABSENT	Collège Jean-de-Brébeuf
14	Féminin	18 ans	Double DEC (musique et sc. humaines)	Collège Jean-de-Brébeuf
15	Masculin	19 ans	Sciences humaines	Collège Jean-de-Brébeuf
16	Masculin	20 ans	Art dramatique	Cégep de Saint-Laurent
17	Féminin	19 ans	Art dramatique	Cégep de Saint-Laurent
18	Masculin	18 ans	Sciences humaines	Collège Jean-de-Brébeuf
19	Masculin	18 ans	Sciences humaines	Collège Jean-de-Brébeuf
20	Masculin	18 ans	Sciences humaines	Collège Jean-de-Brébeuf
21	Masculin	18 ans	Sciences humaines	Collège Jean-de-Brébeuf
22	Masculin	18 ans	Sciences humaines	Collège Jean-de-Brébeuf
23	Masculin	18 ans	Sciences humaines	Collège Jean-de-Brébeuf
24	Masculin	19 ans	Sciences humaines	Collège Jean-de-Brébeuf

APPENDICE E

TABLEAU DES HUIT CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

Description des huit conditions du projet neurodidactique « certitude/doute » en électricité : vocabulaire et acronymes

LE SUJET DONNE UNE BONNE RÉPONSE	CERTITUDE Legitimate Certainty (LC) (Certitude légitime)	DOUTE Under-Estimation (UE) (Sous-estimation)
LE SUJET DONNE UNE MAUVAISE RÉPONSE	<p>Dans cette catégorie, le sujet donne une bonne réponse et il est certain de cette dernière. Ceci peut se produire dans deux conditions :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. La stimulation est scientifiquement correcte (LC/C) → Le sujet répond alors : « selon moi, l'image est correcte ; j'en suis certain » 2. La stimulation est scientifiquement incorrecte (LC/I) → Le sujet répond alors : « selon moi, l'image est incorrecte ; j'en suis certain » 	<p>Dans cette catégorie, le sujet donne une bonne réponse mais exprime un doute sur la valeur de cette dernière. Ceci peut se produire dans deux conditions :</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. La stimulation est scientifiquement correcte (UE/C) → Le sujet répond alors : « selon moi, l'image est correcte, mais je n'en suis pas certain » 4. La stimulation est scientifiquement incorrecte (UE/I) → Le sujet répond alors : « selon moi, l'image est incorrecte, mais je n'en suis pas certain »
	<p>Dans cette catégorie, le sujet donne une mauvaise réponse mais il est certain de cette dernière. Ceci peut se produire dans deux conditions :</p> <ol style="list-style-type: none"> 5. La stimulation est scientifiquement correcte (OE/C) → Le sujet répond alors : « selon moi, l'image est incorrecte ; j'en suis certain » 6. La stimulation est scientifiquement incorrecte (OE/I) → Le sujet répond alors : « selon moi, l'image est correcte ; j'en suis certain » 	<p>Dans cette catégorie, le sujet donne une mauvaise réponse et il exprime un doute sur la valeur de cette dernière. Ceci peut se produire dans deux conditions :</p> <ol style="list-style-type: none"> 7. La stimulation est scientifiquement correcte (LD/C) → Le sujet répond alors : « selon moi, l'image est incorrecte, mais je n'en suis pas certain » 8. La stimulation est scientifiquement incorrecte (LD/I) → Le sujet répond alors : « selon moi, l'image est correcte, mais je n'en suis pas certain »

APPENDICE F

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT ÉTHIQUE

RNQ
COMITÉ MIXTE D'ÉTHIQUE DE LA RECHERCHE

FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

TITRE DU PROJET DE RECHERCHE

Étude neurodidactique du rôle du doute dans les apprentissages scientifiques qui nécessitent des changements conceptuels

RESPONSABLE DU PROJET DE RECHERCHE

Responsable du projet :

Patrice Potvin

Université du Québec à Montréal, Département d'éducation et pédagogie, C.P. 8888, Succursale Centre-Ville, Montréal (Québec), Canada, H3C 3P8,
514-987-3000, poste 1290

Co-chercheur et collaborateur :

Martin Riopel, Université du Québec à Montréal

Kevin N. Dunbar, University of Toronto Scarborough

Steve Masson, Université du Québec à Montréal

ORGANISME SUBVENTIONNAIRE

Conseil de recherches en sciences humaines du Canada (CRSH)

PRÉAMBULE

Nous sollicitons votre participation à un projet de recherche en neuroimagerie. Cependant, avant d'accepter de participer à ce projet de recherche, veuillez prendre le temps de lire, de comprendre et de considérer attentivement les renseignements qui suivent.

Ce formulaire de consentement peut contenir des mots que vous ne comprenez pas. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugerez utiles au chercheur et aux autres membres du personnel affecté au projet de recherche et à leur demander de vous expliquer tout mot ou renseignement qui n'est pas clair.

QU'EST-CE QU'UNE RÉSONANCE MAGNÉTIQUE?

L'examen par résonance magnétique est une technique médicale qui donne des images de grande qualité du corps, du cerveau ainsi que de leur fonctionnement. Cette technique fait appel à une force naturelle présente autour de nous: le magnétisme. Ce champ magnétique intense est créé par un aimant.

La résonance magnétique permet également des examens par résonance magnétique fonctionnelle. Dans ce cas, l'appareil permet de voir les zones du cerveau qui deviennent actives lorsqu'on demande à une personne d'effectuer une tâche précise. Cette tâche peut être motrice, par exemple, lorsque l'on demande à la personne de bouger un doigt ou bien elle peut être cognitive, par exemple lorsque l'on demande à la personne d'effectuer un calcul mental, lire un mot ou encore regarder des photographies. Lorsqu'on demande à une personne d'effectuer une tâche, il y a augmentation de l'arrivée de sang dans la partie du cerveau qui contrôle cette activité. L'arrivée du sang provoque un

changement dans le signal émis par le cerveau et cette modification de signal peut être détectée par l'appareil de résonance magnétique.

Pour l'examen d'imagerie par résonance magnétique, vous serez allongé sur un matelas qui sera lentement glissé dans un grand tube. Le tube est ouvert aux deux extrémités, il est muni d'une excellente aération et très bien éclairé. Un système d'interphone vous permettra de communiquer avec le technicien au besoin. Pour votre confort, on vous demandera de porter soit un casque d'écoute, soit des bouchons protecteurs qui seront installés dans vos oreilles, et ce, afin de diminuer les bruits importants qui sont émis par l'appareil. Pendant que l'appareil fonctionne, il est important que vous demeuriez immobile. Pour ce faire, un coussinet sera placé autour de votre tête afin d'assurer votre immobilité. Aucune substance ne vous sera injectée.

PRÉSENTATION DU PROJET DE RECHERCHE ET DE SES OBJECTIFS

Vous êtes invité à participer à un projet de recherche en neuroimagerie qui vise à identifier et à comprendre les mécanismes cérébraux impliqués dans la réalisation de tâches scientifiques. En d'autres mots, nous voulons mieux comprendre comment le cerveau travaille pour répondre à des questions liées à certains phénomènes scientifiques.

Environ 24 participants seront recrutés pour participer à cette étude.

NATURE ET DURÉE DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Ce projet de recherche se déroulera à l'Unité de Neuroimagerie Fonctionnelle de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal.

Votre participation à ce projet de recherche consistera à passer un examen d'imagerie par résonance magnétique décrit précédemment. Pour cet examen nous vous demanderons d'effectuer certaines tâches qui nous permettront de capter les images de votre cerveau pendant que vous effectuerez ces tâches. La durée de chacune des tâches sera d'environ une heure (incluant des périodes de repos). La durée totale de votre participation à ce projet de recherche sera d'environ deux heures, ce qui inclut le temps d'attente et les étapes préparatoires à votre examen d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle.

Description des tâches à réaliser

Sur un écran, on vous présentera des films où l'on voit se dérouler des phénomènes naturels. Pour chacun de ces films, vous devrez déterminer, en appuyant sur l'un ou l'autre des boutons, si les films présentés sont corrects ou incorrects, et si vous êtes certain ou si vous doutez de votre réponse.

AVANTAGES POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Il n'y a aucun avantage direct pouvant découler de votre participation au projet de recherche. Cependant, les connaissances acquises permettront de contribuer à l'avancement des connaissances scientifiques dans le domaine de l'apprentissage des sciences.

INCONVÉNIENTS POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Les conditions imposées par l'utilisation de l'imagerie par résonance magnétique peuvent entraîner un certain inconfort du fait de devoir rester immobile pendant l'examen et un inconfort pourrait également être associé au bruit que génère le fonctionnement de l'appareil. Vous pourriez aussi ressentir un certain stress ou une sensation de claustrophobie.

RISQUES POUVANT DÉCOULER DE VOTRE PARTICIPATION AU PROJET DE RECHERCHE

Selon les connaissances actuelles, votre participation à un examen d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle ne vous fera courir, sur le plan médical, aucun risque si vous ne présentez aucune contre-indication.

Par ailleurs, à cause de la puissance de ce champ magnétique produit par l'appareil, il est nécessaire de prendre certaines précautions. C'est pourquoi vous devez obligatoirement remplir un questionnaire détaillé afin de détecter toute contre-indication à la passation de cet examen, par exemple, la présence d'un stimulateur cardiaque, d'un clip d'anévrisme, de prothèse métallique, de prothèse ou clip valvulaire cardiaque, de présence de métal dans l'œil ou sur le corps, de tatouage, de piercing, de broches dentaires ou si vous souffrez de claustrophobie aiguë. Les femmes enceintes et celles qui allaitent ne devraient pas passer un examen d'imagerie par résonance magnétique.

La vérification rigoureuse de la présence de contre-indication sera assumée par le technologue en fonction à l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle.

RISQUES ASSOCIÉS À LA GROSSESSE

Quelques études effectuées au cours des dernières années suggèrent que l'imagerie par résonance magnétique comporte certains risques pour la santé des embryons et des fœtus. Ces risques sont attribués au champ magnétique de radiofréquence causent parfois un réchauffement, ainsi qu'au champ produit par les gradients qui, de par leur interaction avec le champ magnétique statique, produisent beaucoup de bruit.

Par conséquent, les femmes enceintes ou qui allaitent seront exclues de l'étude. Les femmes susceptibles de devenir enceintes devront subir un test de grossesse avant leur examen de résonance magnétique.

INDEMNISATION EN CAS DE PRÉJUDICE

Si, dans le cadre de votre participation à l'étude, vous deviez subir quelque préjudice que ce soit, vous recevrez tous les soins médicaux nécessaires, sans frais de votre part.

En acceptant de participer à ce projet, vous ne renoncez à aucun de vos droits ni ne libérez les chercheurs, l'organisme subventionnaire ou l'établissement de leur responsabilité civile et professionnelle.

COMPENSATION FINANCIÈRE

Vous recevrez une compensation financière de 40 dollars (20 dollars pour votre participation au projet de recherche et un montant forfaitaire de 20 dollars pour vos déplacements). De plus, suite à votre participation, vous recevrez une image numérique de votre cerveau.

PARTICIPATION VOLONTAIRE ET POSSIBILITÉ DE RETRAIT

Votre participation à ce projet de recherche est volontaire. Vous êtes donc libre de refuser d'y participer. Vous pouvez également vous retirer de ce projet à n'importe quel moment, sans avoir à donner de raisons, en faisant connaître votre décision au chercheur responsable du projet ou à l'un des membres du personnel affecté au projet.

Le chercheur responsable du projet de recherche, le Comité mixte d'éthique de la recherche du RNQ, l'organisme subventionnaire peuvent mettre fin à votre participation, sans votre consentement, si de nouvelles découvertes ou informations indiquent que votre participation au projet n'est plus dans votre intérêt, si vous ne respectez pas les consignes du projet de recherche ou s'il existe des raisons administratives d'abandonner le projet.

Si vous vous retirez ou êtes retiré du projet, l'information déjà obtenue dans le cadre de ce projet sera conservée aussi longtemps que nécessaire pour rencontrer les exigences réglementaires.

Toute nouvelle connaissance acquise durant le déroulement du projet qui pourrait affecter votre décision de continuer d'y participer vous sera communiquée sans délai verbalement et par écrit.

RETOUR D'INFORMATION ET AUTORISATION DE TRANSMETTRE LES RÉSULTATS

Les scans de recherche ne font pas l'objet d'un examen neuroradiologique. Cependant, l'examen d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle peut mettre en évidence des problèmes jusque là ignorés. C'est pourquoi, en présence de toute particularité dans les scans, vous serez invité à passer un nouvel examen avec un appareil de 1.5 teslas pour vérification. Advenant, la confirmation d'une anomalie, un neurologue transmettra ces données à votre médecin traitant ou vous assurera un suivi.

CONFIDENTIALITÉ

Durant votre participation à ce projet de recherche, le chercheur responsable du projet ainsi que son personnel recueilleront et consigneront dans un dossier de recherche les renseignements vous concernant. Seuls les renseignements nécessaires à la bonne conduite du projet de recherche seront recueillis.

Ces renseignements comprennent les informations provenant des questionnaires de dépistage présenté à la fin de ce document, ainsi que les résultats de tous les tests, examens et procédures que vous aurez à faire lors de ce projet de recherche. Votre dossier comprend aussi d'autres renseignements tels que votre nom, votre sexe, votre date de naissance, votre origine ethnique et le nom de votre programme d'études.

Tous ces renseignements recueillis au cours du projet de recherche demeureront strictement confidentiels dans les limites prévues par la loi. Afin de préserver votre identité et la confidentialité de ces renseignements, vous ne serez identifié que par un numéro de code. La clé du code reliant votre nom à votre dossier de recherche sera conservée par le chercheur responsable du projet de recherche dans un lieu sécuritaire.

Le chercheur responsable utilisera les données du projet de recherche à des fins de recherche dans le but de répondre aux objectifs scientifiques du projet de recherche décrits dans le formulaire d'information et de consentement.

Les données du projet de recherche pourront être publiées dans des revues médicales ou partagées avec d'autres personnes lors de discussions scientifiques. Aucune publication ou communication scientifique ne renfermera quoi que ce soit qui puisse permettre de vous identifier. Également, les données du projet pourraient servir pour d'autres analyses reliées au projet ou pour l'élaboration de projets de recherche futurs.

À des fins de surveillance et de contrôle, votre dossier de recherche ainsi que vos dossiers médicaux, s'il y a lieu, pourront être consultés par une personne mandatée par le comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie/Québec, par une personne mandatée par le ministre de

la Santé et des Services sociaux ou par des organismes gouvernementaux mandatés par la loi. Toutes ces personnes et ces organismes adhèrent à une politique de confidentialité.

À des fins de protection, notamment afin de pouvoir communiquer avec vous rapidement, vos noms et prénoms, vos coordonnées et la date de début et de fin de votre participation au projet seront conservés pendant un an après la fin du projet dans un répertoire maintenu par le chercheur responsable.

Vous avez le droit de consulter votre dossier de recherche pour vérifier l'exactitude des renseignements recueillis aussi longtemps que le chercheur responsable du projet de recherche, l'établissement ou l'institution de recherche détiennent ces informations. Cependant, afin de préserver l'intégrité scientifique du projet de recherche, vous n'aurez accès à certaines de ces informations qu'une fois l'étude terminée.

FINANCEMENT

Le chercheur a reçu des fonds de l'organisme subventionnaire pour effectuer cette recherche. Les fonds reçus couvrent les frais reliés à cette recherche.

ACCÈS AUX CHERCHEURS

Si vous avez des questions concernant le projet de recherche ou si vous croyez que vous éprouvez un problème de santé relié à votre participation au projet de recherche vous pouvez communiquer avec le chercheur responsable de l'étude, Patrice Potvin, professeur à l'Université du Québec à Montréal, au (514) 987-3000, poste 1290.

PROCÉDURES EN CAS D'URGENCE MÉDICALE

Veuillez noter que l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal n'est pas un centre hospitalier de soins de courte durée qui offre des services d'urgence et qui compte sur la présence sur place d'un médecin 24 heures sur 24. Par conséquent, advenant une condition médicale qui nécessiterait des soins immédiats, les premiers soins vous seraient dispensés par le personnel en place et des dispositions seraient prises afin de vous transférer, si nécessaire, aux urgences d'un hôpital avoisinant.

EN CAS DE PLAINTE

Pour tout problème concernant les conditions dans lesquelles se déroule votre participation à ce projet, vous pouvez, après en avoir discuté avec la personne responsable du projet, faire part de vos préoccupations au responsable des plaintes de l'Institut universitaire de gériatrie de Montréal à l'adresse suivante : Commissaire local aux plaintes et à la qualité des services, Institut universitaire de gériatrie de Montréal, 4565, chemin Queen-Mary, Montréal (Québec) H3W 1W5. Tél. : (514) 340-3517.

INFORMATION SUR LA SURVEILLANCE ÉTHIQUE

Le comité mixte d'éthique de la recherche du Regroupement Neuroimagerie/Québec a approuvé ce projet de recherche et s'assure du respect des règles éthiques durant tout le déroulement de la recherche. Pour toute information, vous pouvez rejoindre le secrétariat du Comité au numéro : (514) 340-2800, poste 3250.

CONSENTEMENT

Titre du projet de recherche : Étude neurodidactique du rôle du doute dans les apprentissages scientifiques qui nécessitent des changements conceptuels

CONSENTEMENT DU SUJET

J'ai pris connaissance du formulaire d'information et de consentement. Je reconnais qu'on m'a expliqué le projet, qu'on a répondu à mes questions et qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre une décision.

Je consens à participer à ce projet de recherche aux conditions qui y sont énoncées. Une copie signée et datée du présent formulaire d'information et de consentement m'a été remise.

Nom et signature du sujet de recherche

Date

SIGNATURE DE LA PERSONNE QUI A OBTENU LE CONSENTEMENT SI DIFFÉRENT DU CHERCHEUR RESPONSABLE DU PROJET DE RECHERCHE.

J'ai expliqué au sujet de recherche les termes du présent formulaire d'information et de consentement et j'ai répondu aux questions qu'il m'a posées.

Nom et signature de la personne qui obtient le consentement

Date

SIGNATURE ET ENGAGEMENT DU CHERCHEUR RESPONSABLE DU PROJET

Je certifie qu'on a expliqué au sujet de recherche les termes du présent formulaire d'information et de consentement, que l'on a répondu aux questions que le sujet de recherche avait à cet égard et qu'on lui a clairement indiqué qu'il demeure libre de mettre un terme à sa participation, et ce, sans préjudice.

Je m'engage, avec l'équipe de recherche, à respecter ce qui a été convenu au formulaire d'information et de consentement et à en remettre une copie signée au sujet de recherche.

Nom et signature du chercheur responsable du projet de recherche

Date

DÉPISTAGE PRÉLIMINAIRE POUR ÉTUDE D'IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE (IRM)

Veuillez écrire en caractère d'imprimerie

Nom :	Prénom :
Date de naissance : (jour/mois/année)	Sexe : F <input type="checkbox"/> M <input type="checkbox"/> Poids : ___ kg ___ lbs Grandeur : ___ m ___ pi
Chercheur (e) / Projet :	Numéro d'identification :

Afin d'assurer la sécurité de toute personne accédant au territoire de l'Unité de neuroimagerie fonctionnelle, il est très important que ce questionnaire soit complété correctement.

1. Avez-vous déjà subi une opération ?

	Non	oui	Si oui, veuillez préciser le type d'opération et la date :
Tête			
Thorax ou cœur			
Abdomen			
Bras, mains			
Jambes, pieds			
Colonne vertébrale			
Yeux			
Autres :			

2. Portez-vous :

	non	oui
Stimulateur cardiaque (Pace-maker) ?		
Électrodes épicaudiques ?		
Clip pour anévrisme cérébral ?		
Prothèse cochléaire ? Prothèse auditive ?		
Filtre ou cathéter dans un vaisseau sanguin ?		
Neurostimulateur ?		
Stimulateur électronique pour les os ?		
Prothèse valvulaire cardiaque ?		
Corps étrangers métalliques ? (ex: balles, fragments d'obus, éclats métalliques)		
Pompe à insuline implantée ?		
Prothèse orthopédique ? (ex: clou, vis, plaque)		
Membre (s) artificiel (s) ?		
Maquillage permanent ? Tatouage(s) ?		
Perçage(s) ?		
Implant(s) magnétique(s) ou non magnétique(s) ?		
Diaphragme, stérilet ?		
Dentier (Appareil orthodontie) ?		
Implant(s) ou prothèse(s) oculaire(s) ?		
Système de distribution transdermique (ex: timbre de nitroglycérine)		

Autres :

- | | | |
|--|-----|-----|
| 3. Êtes-vous enceinte ou croyez-vous l'être ? | non | oui |
| 4. En cas de doute, accepteriez-vous de passer un test de grossesse | non | oui |
| 5. Êtes-vous claustrophobe ? | non | oui |
| 6. Avez-vous déjà été blessé(e) par un morceau de métal ?
(ex: accident de voiture, accident de travail, blessure(s) de guerre)
Si oui, veuillez préciser: _____ | non | oui |
| 7. Avez-vous subi un examen par résonance magnétique ? | non | oui |
| 8. Avez-vous déjà été: | | |
| Machiniste? | non | oui |
| Soudeur? | non | oui |
| Opérateur de machinerie lourde? | non | oui |
| Travailleur de métal ? | non | oui |
| 9. Souffrez-vous de problème respiratoire ou moteur ? | non | oui |

On m'a expliqué les procédures à suivre lors d'une session d'IRM. On m'a informé des mesures de sécurité à appliquer et on a répondu à toutes mes questions. Je certifie que les renseignements ci-dessus sont exacts au meilleur de mes connaissances et consens à participer à une étude d'IRM.

Signature participant/parent/tuteur légal

Date

Signature médecin/chercheur

Date

Espace réservé

Participation autorisée :	non	oui
Investigation:	non	oui

APPENDICE G

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL LORS DE L'ACQUISITION DES DONNÉES

Protocole expérimental lors de l'acquisition des données
Nom du projet : DOUTE (participants 01 à 24)
Approbation éthique : 09-10-032

Étape 1 – Matériel à apporter à l'UNF

- 3 copies du formulaire de consentement (une pour le participant, une pour l'UNF et une à conserver), les copies doivent être présignées par le chercheur;
- 3 copies du formulaire de réquisition qui inclut le formulaire de dépistage (présignées également);
- 1 clé USB (pour enregistrer les réponses du participant et pour avoir une copie de la tâche en cas de problème);
- 1 cahier de bord;
- 1 crayon;
- 1 clé (du casier);
- 1 clé de l'UNF (passe magnétique);

Étape 2 – Préparation

- Introduction (remerciement, brève description des 3 étapes : préparation, simulation, scan);
- Survol et signature des formulaires de consentement (3 copies) ;
- Survol et signature des formulaires de réquisition incluant le formulaire de dépistage (3 copies) ;
- Vérifier si le participant ne porte pas :

Bijoux/Bagues/Boucles d'oreilles	Appareil de métal
Épingles à cheveux	Maquillage
Elastiques à cheveux	Dentier
Soutien-gorge contenant du métal (ex: cerceaux dans les bonnets)	Mousse ou gel pour les cheveux
Montre	Cheveux mouillés
Épingles de sûreté	Verres de contact de couleur

- Remise d'une copie de chacun des formulaires (consentement + dépistage) au participant ;
- Remise d'une copie de chacun des formulaires (consentement + dépistage) à André Cyr ou Carolyn Hurst ;
- Aller chercher un pyjama dans le bureau d'André Cyr (en haut « small ») ;
- Déshabillage/habillage du participant (garder seulement les sous-vêtements sans soutien-gorge, garder les bas et les souliers, enlever les souliers dans la salle d'IRM).

Étape 3 – Simulation

- Pendant que le participant attend dans la salle d'attente, préparer la salle de simulation (allumer le simulateur, le fan et la lumière, vérifier que le fil de la boîte de réponse se rend au simulateur, vérifier que les réponses fonctionnent, mettre le drap sur le simulateur, bonnet sur le drap, les draps et le bonnet sont dans l'armoire du fond de la salle de simulation);
- Visite des lieux avec le participant (montrer où sont les salles d'IRM et de contrôle);
- Dans la salle de simulation, montrer la boîte de réponse
- Dire que la tâche reprend les éléments de la simulation;
- Faire réaliser la tâche de pratique par le participant (Bureau/Raccourcis vers Chercheurs/Turmel/consignes.es2) à la table (Pour interrompre la tâche en cas de problème : appuyer simultanément sur Ctrl-Alt-Esc-Shift.). Indiquer subject : 0, session : 1 dans la boîte qui apparaît;
- Installer le participant dans le simulateur et lui donner les manettes et expliquer qu'il **ne doit pas bouger** ;
- Faire réaliser la tâche de pratique par le participant (Bureau/Raccourcis vers Chercheurs/Turmel/Pratique.es2) dans le simulateur. (Pour interrompre la tâche en cas de problème : appuyer simultanément sur Ctrl-Alt-Esc-Shift.) ;

- Vérifier si le participant bouge la tête ou les pieds, dans le simulateur lorsqu'il donne ses réponses.
- Si nécessaire, refaire la tâche de pratique une deuxième fois dans le simulateur, jusqu'à ce que le sujet soit familier avec la tâche mais aussi avec la façon de donner sa réponse, cf. appuyer sur les boutons ;
- Faire entendre le bruit du scan (sur l'ordinateur ouvrir les fichiers Bureau/Raccourcis vers Chercheurs/Tumel/EPI... et Raccourcis vers Chercheurs/Tumel/T1
- S'il reste du temps, le participant peut attendre dans la salle d'attente avant le début de la séance d'IRM.
- Si le participant a attendu plus de 20 minutes dans la salle d'attente entre la simulation et le scan, il faut refaire une dernière séance de pratique avant d'entrer dans le scan (sur la table).

À mentionner au participant avant la simulation :

- Dans la salle de simulation, expliquer au sujet qu'il y aura plusieurs étapes : localisateur (13s), test des boutons (777-888), séquence 1 (max 11min), séquence 2 (max 11min), Infos (environ 3 minutes, pas de réponses à donner), séquence 3 (max 11min), séquence 4 (max 11min) et fieldmap + anatomique (9m14s, yeux fermés, pas de réponses à donner);
- Avertir que (1) la croix apparaîtra immédiatement après avoir appuyé sur le bouton (OK d'appuyer lors de la présentation de la croix si pas eu le temps) et (2) que les images continues à être acquise même lorsque la tâche est terminée (pendant environ 1 minute) et il ne faut pas bouger tant qu'il y a le son (et éviter les mouvements importants même entre les séquences);
- Avertir qu'il y aura des bouchons pour les oreilles et un casque d'écoute (expliquer comment placer les bouchons);
- Insister sur l'importance de ne pas bouger, même entre les runs;
- Dire qu'il y aura un bouton en forme de poire pour les urgences; il faut appuyer seulement si cela est nécessaire. Dire qu'on entend ce que le participant dit, mais pas durant les séquences (à cause du bruit), d'où la poire.

Étape 4 – IRM

- Installer le participant dans la salle d'IRM avec la technicienne (bonnet, bouchon, boîte de réponse droite et gauche: rappel main droite = correct, main gauche = incorrecte, index = certain, majeurs = incertain);
- Brancher la souris à double fil (souris TTL to left button response) dans le hub USB + boîte de réponse (la souris se trouve dans l'armoire du fond de la salle de contrôle et le fil de la boîte de réponse est accroché au comptoir). La souris doit être branchée au hub USB + fil armoire en haut à gauche → visser le bout de métal)
- Vérifier que le fil de la boîte de réponse est branché dans le hub USB et faire un test avec Bloc Notes en demandant au participant d'appuyer sur les boutons (quand le participant appuie, la lumière devrait s'allumer (sur le mur) et le chiffre 2 ou 3 = le circuit est correct; 7 ou 8 = le circuit est incorrect; 2 et 7 = certain; 3 et 8 = incertain; devraient s'inscrire dans Bloc Notes. Si des lettres apparaissent au lieu de chiffres, il faut modifier le réglage de la boîte en plaçant le bouton à la position du bas et en débranchant puis rebranchant l'alimentation. Demander l'assistance d'André Cyr, au besoin;
- Avertir le participant du début et ensuite la technicienne débute la séquence le localisateur (durée : environ 0m13s);
- Débuter la run 1, (Pour interrompre la tâche en cas de problème : appuyer simultanément sur Ctrl-Alt-Esc). Lorsque demandé par E-prime, inscrire le numéro du sujet (subject), pour la session TOUJOURS choisir 1. Choisir la run 1 (fichiers bleu-vert) + appuyer sur Run (bonhomme qui court). Dire à Carolyn que c'est prêt.
- Remplir la « feuille de bord » à chaque run (date, patient, nom des séquences, dernier volume, etc.);

- Débuter les runs 2, Infos, 3 et 4. Parler au participant entre les séries (laisser enfoncé bouton écoute + peser sur bouton parole, mais relâcher pour entendre la réponse du participant). Choisir chaque n° de run + appuyer sur *Run*. Pour les infos, écrire *subject 0* et session 1.
- Après la run 4, fermer le logiciel. **IMPORTANT** : Ne pas toucher à l'ordinateur durant le scan anatomique!
- Enregistrer les résultats sur une clé USB (fichiers p/ex données01.edate)

Étape 5 – Accompagnement des sujets

- Rhabillage + reprendre ses effets personnels;
- Recueillir les commentaires et les noter sur le feuille de route;
- Annoncer que la photo numérique sera envoyée par courriel dans les prochains jours;
- Accompagnement à la porte et remerciements.

Étape 6 – Enregistrement des données de neuroimagerie

- Les données sont accessibles via le site de l'UNF (<http://unf-montreal.ca>) sous Services/Récupération des données d'IRM
- Entrer le nom d'utilisateur et le mot de passe;
- Choisir le format MINC et cliquer Télécharger (il faut attendre plusieurs minutes et le fichier apparaît en haut dans la section Disponible pour téléchargement);
- Cliquer sur le fichier à télécharger.
- Les données sont aussi accessibles au R S722 (situé près du climatiseur extérieur).
- Il faut avoir créé un compte d'utilisateur pour accéder aux données (voir Mathieu Desrosiers)
- Entrer le « login » et mot de passe :
- Cliquer sur terminal et taper le mot de passe
- Taper unf2dcm *patient ID* (ex. unf2dcm 200704230900 ou Physique_S03)
- Attendre (3 à 40 minutes selon la date de transfert des fichiers; les fichiers sont enregistrés dans data/datascan)
- Cliquer sur le dossier temporaire
- Enregistrer les fichiers sur une clé USB.
- Pour plus d'informations, voir la feuille « Procédure de transfert de données de l'UNF » de Mathieu Desrosiers

APPENDICE H

FORMULAIRE DE L'UNITÉ DE NEUROIMAGERIE FONCTIONNELLE

UNF Unité de
neuroimagerie
fonctionnelle

	OPTION 1	OPTION 2
Date :		
Plage horaire :		

Section 1 : Réquisition IRM

IP :	
Tél :	
Chercheur :	
Tél :	
No. Éthique :	

PARTICIPANT			
Nom :			
Prénom :			
Date de naissance :			
Tél:			
Poids:		<input type="checkbox"/> kg	<input type="checkbox"/> lbs
Hauteur:		<input type="checkbox"/> m	<input type="checkbox"/> pi
Sex :	<input type="checkbox"/> M		<input type="checkbox"/> F

Protocole* :

PatientID** :

* S'il s'agit d'une nouvelle étude, inscrire un nom de 10 caractères max
 **Code associée à la plage horaire, et donné le jour de la séance

À L'USAGE DE L'OPÉRATEUR DE L'IRM		
Données	Commentaires :	
Log book :		
Archivées :		
Transfert :		
<input type="checkbox"/> Morpheus		
<input type="checkbox"/> Samba		
<input type="checkbox"/>		
Début:		
Fin :		
Session ID facturation		

Opérateur IRM

Date (aaaa-mm-jj)

Section 2 : Dépistage pour étude d'IRM

Afin d'assurer la sécurité de toute personne accédant au territoire de l'UNF, il est très important que ce questionnaire soit complété correctement.

1. Avez-vous déjà subi une opération ?

	Non	Oui	Si oui, veuillez préciser le type d'opération et la date :
Tête	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Thorax ou cœur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Abdomen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Bras, mains	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Jambes, pieds	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Colonne vertébrale	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Yeux	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Autres :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

2. Portez-vous :

	Non	Oui	Si oui, date
Stimulateur cardiaque (Pace-maker) ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Électrodes épicaudiques ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Clip pour anévrisme cérébral ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Prothèse cochléaire ? Prothèse auditive ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Filtre ou cathéter dans un vaisseau sanguin ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Neurostimulateur ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Stimulateur électronique pour les os ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Prothèse valvulaire cardiaque ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Corps étrangers métalliques ? (ex: balles, fragments d'obus, éclats métalliques)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Pompe à insuline implantée ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Prothèse orthopédique ? (ex: clou, vis, plaque)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Membre (s) artificiel (s) ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Maquillage permanent ? Tatouage(s) ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Perçage(s) ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Implant(s) magnétique(s) ou non magnétique(s) ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Diaphragme, stérilet ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Dentier (Appareil orthodontie) ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Implant(s) ou prothèse(s) oculaire(s) ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Système de distribution transdermique (ex: timbre de nitroglycerine)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Autres :			

3. Êtes-vous enceinte ou croyez-vous l'être ?

Non ☐ Oui ☐

4. En cas de doute, accepteriez-vous de passer un test de grossesse ?

☐ ☐

- Débuter les runs 2, Infos, 3 et 4. Parler au participant entre les séries (laisser enfoncé bouton écoute + peser sur bouton parole, mais relâcher pour entendre la réponse du participant). Choisir chaque n° de run + appuyer sur *Run*. Pour les infos, écrire *subject 0* et session 1.
- Après la run 4, fermer le logiciel. **IMPORTANT** : Ne pas toucher à l'ordinateur durant le scan anatomique!
- Enregistrer les résultats sur une clé USB (fichiers p/ex données01.edate)

Étape 5 – Raccourci des sujets

- Rhabillage + reprendre ses effets personnels;
- Recueillir les commentaires et les noter sur la feuille de route;
- Annoncer que la photo numérique sera envoyée par courriel dans les prochains jours;
- Raccourci à la porte et remerciements.

Étape 6 – Enregistrement des données de neuroimagerie

- Les données sont accessibles via le site de l'UNF (<http://unf-montreal.ca>) sous Services/Récupération des données d'IRM
- Entrer le nom d'utilisateur et le mot de passe;
- Choisir le format MINC et cliquer Télécharger (il faut attendre plusieurs minutes et le fichier apparaît en haut dans la section Disponible pour téléchargement);
- Cliquer sur le fichier à télécharger.
- Les données sont aussi accessibles au R S722 (situé près du climatiseur extérieur).
- Il faut avoir créé un compte d'utilisateur pour accéder aux données (voir Mathieu Desrosiers)
- Entrer le « login » et mot de passe :
- Cliquer sur terminal et taper le mot de passe
- Taper unf2dcm patient ID (ex. unf2dcm 200704230900 ou Physique_S03)
- Attendre (3 à 40 minutes selon la date de transfert des fichiers; les fichiers sont enregistrés dans data/dataset)
- Cliquer sur le dossier temporaire
- Enregistrer les fichiers sur une clé USB.
- Pour plus d'informations, voir la feuille « Procédure de transfert de données de l'UNF » de Mathieu Desrosiers